



anses

Le cadmium

**Priorisation des leviers d'action
pour réduire l'imprégnation de
la population française selon
une approche d'exposition agrégée**

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Février 2026

Maisons-Alfort, le 18 février 2026

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

relatif à la priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium selon une approche d'exposition agrégée

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux, l'évaluation des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments et, en évaluant l'impact des produits réglementés, la protection de l'environnement.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du Code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses s'est autosaisie le 02 août 2023 pour la réalisation d'un avis relatif à la priorisation des leviers d'action en vue de réduire l'imprégnation de la population française au cadmium à l'aide d'une approche d'évaluation de l'exposition agrégée.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique omniprésent dans les sols, l'air, les eaux et les sédiments (Efsa, 2009). Le cadmium est présent dans l'environnement de manière naturelle et sa présence peut être renforcée par des apports liés à différentes activités anthropiques, notamment agricoles et industrielles. Le cadmium présent dans le sol pénètre dans les végétaux principalement par voie racinaire (et parfois par voie foliaire dans le cas de particules atmosphériques fines) et entre ainsi dans le réseau trophique. Les fumeurs sont aussi exposés au cadmium présent dans le tabac.

Le cadmium est identifié comme un contaminant préoccupant pour la santé publique car il est reconnu cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction (CMR) (IARC, 2012 ; règlement européen n° 1272/2008, dit CLP pour classification, étiquetage et emballage des

substances et des mélanges¹). Il entraîne aussi chez l'Homme des atteintes rénales et une fragilité osseuse à la suite d'une exposition prolongée, notamment par voie orale (Anses, 2019).

Pour l'exposition par voie alimentaire, les Études de l'alimentation totale (EAT) conduites par l'Anses ont évalué une surexposition d'une partie de la population générale française au cadmium. Selon la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2, Anses, 2011a) et l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi, Anses, 2016), une part des adultes et des enfants est exposée au cadmium au-delà de la dose journalière tolérable (DJT) retenue à cette époque, soit : 0,6 % des adultes, 14% des enfants de 3 à 17 ans, et jusqu'à 36% des enfants de moins de 3 ans.

Reflète de l'ensemble des expositions toutes voies confondues (alimentaire, inhalation, ingestion de poussières, ...), Esteban², la dernière étude nationale de biosurveillance, publiée en 2021 par Santé publique France (SpF), indique que les niveaux d'imprégnation³ en cadmium mesurés chez les adultes français apparaissent plus élevés que ceux mesurés lors de la précédente étude de biosurveillance française (Étude Nationale Nutrition Santé (ENNS), 2006-2007). Dans Esteban, 47,6% de la population générale adulte (18-60 ans) présente des niveaux d'imprégnation en cadmium objectivés par un dépassement de la concentration critique⁴ de cadmium urinaire de 0,5 µg g⁻¹ de créatinine (Oleko et al. 2021). Cette évolution est cohérente avec les augmentations des expositions alimentaires observées dans les précédentes EAT (EAT1 et EAT2).

Face à ces constats, l'Anses s'est autosaisie pour, d'une part, réaliser une réévaluation globale de l'exposition humaine au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition et, d'autre part, identifier des leviers d'action⁵ possibles pour réduire le niveau d'imprégnation de la population française. L'examen de la contribution de ces sources et voies d'exposition permet de proposer des options d'action. Les objectifs de cette auto-saisine visent à :

- (i) développer une méthode d'évaluation de l'exposition agrégée à partir de différentes sources et voies d'exposition pour la population générale française ;
- (ii) caractériser et tester la contribution des sources d'exposition sur les niveaux d'imprégnation de la population française au cadmium, en appui à l'identification de mesures ciblées ;
- (iii) étudier, à l'aide d'une analyse socio-économique (ASE), différentes options d'action permettant de réduire l'imprégnation de la population française au cadmium, ainsi que leur priorisation.

Les résultats visent à fournir des éléments d'amélioration de la maîtrise des risques sanitaires associés au cadmium pour la population générale française.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Janvier 2024) ».

¹ <https://chem.echa.europa.eu/100.028.320/harmonised/16394?searchText=cadmium>

² Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition

³ Imprégnation : concentration dans l'organisme. La mesure de la cadmiurie (concentration urinaire en cadmium) est considérée comme un marqueur fiable de l'exposition interne au cadmium chez l'Homme.

⁴ Correspond à la Valeur Toxicologique de Référence interne (VTR interne), terminologie utilisée dans la suite de l'expertise.

⁵ « L'action » est présentée comme une intervention, mesure, dispositif ou instrument, conçus et mis en place pour répondre à une situation considérée comme problématique.

L'Anses a confié l'instruction de cette expertise au groupe de travail « Priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium, selon une approche d'exposition agrégée » (GT Cadmium), rattaché au Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques physico-chimiques dans les aliments » (CES ERCA).

Cette expertise a été pilotée par l'Unité d'évaluation des risques liés aux aliments (UERALIM) et par la Direction de l'évaluation des risques (DER). L'analyse socio-économique a été coordonnée par la Direction sciences sociales, économie et société (DiSSES), en support à l'identification et la priorisation de leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium. L'Unité méthodologie et études (UME, DER) a apporté une contribution scientifique à l'expertise. L'Unité d'évaluation des risques liés à l'air (UERA, DER), l'Unité d'évaluation des produits du tabac et produits connexes (UEPTC, DER), l'Unité valeurs de référence et risques liés aux substances chimiques (UEVRRISC, DER), et l'Unité résidus et sécurité des aliments (URSA, Direction de l'évaluation des produits réglementés - DEPR) ont été consultées au cours de l'expertise.

Le cadmium a été identifié parmi les substances à forts enjeux réglementaires et sanitaires dans le « Partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques » (PARC), financé dans le cadre du programme européen « Horizon Europe ». Les travaux de cette auto-saisine s'intègrent dans la tâche T6.2 de PARC, portant sur le développement d'une approche intégrée pour l'évaluation de l'exposition et du risque du *workpackage* WP6 « Innovation en évaluation réglementaire du risque ». L'expertise de cette autosaisine a bénéficié en retour des approches développées dans le cadre des projets de cette tâche, en particulier les projets P6.2.1a « *Source-to-dose* » et P6.2.1b « *Aggregate exposure* ». Ces projets permettent de développer la stratégie pour la mise en œuvre d'une exposition agrégée au cadmium à partir des différentes sources et voies d'exposition qui considère les populations générale et professionnelle. En retour, ces projets se sont enrichis des travaux et des réflexions du GT. Toutefois, la présente expertise ne concerne que la population générale, le volet « exposition professionnelle » n'est pas pris en compte.

Le Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques physico-chimiques dans les aliments » (ERCA) a été identifié comme le collectif d'experts pilote pour endosser les analyses et conclusions issues de l'expertise du GT Cadmium.

La saisine et les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement au CES ERCA (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques) entre juillet 2023 et novembre 2025. Les travaux ont également été présentés et validés par les experts du CES « Analyse Socio-Économique » (ASE) en ce qui concerne l'expertise relevant de son périmètre lié à l'analyse des options de mesures de maîtrise du risque.

Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments transmis par les membres de ces deux CES. Ces travaux sont ainsi issus de collectifs d'experts aux compétences complémentaires.

Ils ont été adoptés par le CES ERCA réuni le 14 novembre 2025.

Plusieurs auditions ont été conduites au cours de l'expertise, venant notamment en appui à l'analyse thématique des options d'action. Les organisations suivantes ont été auditionnées :

- Afaïa, syndicat professionnel représentant les entreprises qui fournissent les matières fertilisantes et intrants innovants des cultures végétales durables (supports de culture,

paillages, amendements organiques, engrais organiques et organo-minéraux et biostimulants), le 24 mars 2025 ;

- COMIFER, Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée, le 4 mars 2025 ;
- DGAL, Direction générale de l'alimentation, Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires ainsi que le Bureau des intrants et du biocontrôle, le 6 février 2025 ;
- FEDENE, Fédération professionnelle des entreprises de services pour l'énergie et l'environnement, le 10 avril 2025 ;
- SYPREA, Syndicat des Professionnels du recyclage par valorisation Agronomique, le 10 avril 2025 ;
- UNIFA, Union des Industries de la Fertilisation, le 14 mars 2025.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ET DU GT CADMIUM

3.1. La situation sanitaire liée au cadmium en France

Depuis une quinzaine d'années, l'Anses conduit des travaux qui ont mis en évidence la surexposition d'une partie de la population française au cadmium, notamment par voie alimentaire (Anses, 2011a&b ; 2016 ; 2019 et 2020), travaux qui ont également fait l'objet de publications dans des revues internationales (Arnich et al. 2012 ; Jean et al. 2015 ; Jean et al. 2018 ; Leconte et al. 2021 ; Carne et al. 2021 ; Carne et al. 2022). L'Agence a notamment émis des recommandations en vue de réduire l'exposition de la population à cette substance, notamment par la proposition de valeurs maximales de concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés et matières fertilisantes en vue de réduire l'exposition de la population à cette substance (Anses, 2019).

De plus, l'imprégnation, qui reflète l'ensemble des sources d'exposition, y compris celles autres que l'alimentation, s'est avérée élevée dans la population de l'étude Esteban menée par Santé publique France (SpF), comparativement à celles observées dans d'autres pays nord-américains et européens, avec des niveaux pouvant être jusqu'à trois à quatre fois supérieurs (Oleko et al. 2021). L'imprégnation par le cadmium en France en 2014-2016 pour la population générale adulte était plus élevée que celle mesurée en 2006-2007 (ENNS) (Fréry et al. 2011). Les résultats de l'étude Esteban ont notamment montré que 47,6% de la population générale adulte (18-60 ans) dépassaient le seuil de concentration critique de cadmium urinaire de $0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine. Compte tenu de niveaux d'imprégnation plus élevées dans l'étude Esteban comparés à celles observées dans l'étude ENNS, des effets sanitaires du cadmium sur la santé (cancérogénicité certaine ou suspectée pour l'Homme selon le type de cancer, effets osseux, rénaux, cardiovasculaires et neuro-développementaux) et du caractère bioaccumulable dans l'organisme en lien avec sa demi-vie longue⁶, la

⁶ La demi-vie d'élimination biologique du cadmium est comprise entre 10 et 30 ans

nécessité de réduire les sources d'exposition, telle que déjà formulée (Anses 2011 ; 2019) est réaffirmée.

Par ailleurs, dans le cadre du projet HBM4EU⁷, Ougier et al. (2021) ont réalisé une évaluation économique du fardeau de l'ostéoporose attribuable à l'exposition au cadmium chez les femmes de plus de 55 ans en France, Belgique et Espagne. Environ 23 % des cas d'ostéoporose sont attribuables à cette exposition, avec une projection pouvant aller jusqu'à 34 % de femmes affectées d'ici 2040 si les niveaux d'exposition ne diminuent pas. Les coûts du fardeau associé aux fractures liées à l'ostéoporose (poignets, hanches et vertèbres) et imputables au cadmium ont été évalués pour chaque pays ciblé. Les coûts estimés varient entre 0,12 (estimation basse en Belgique) et 2,6 milliards d'euros (estimation haute en France) chez les femmes âgées de plus de 55 ans et présentant un risque de fracture imputable à l'exposition au cadmium. Ces résultats montrent l'importance de réduire l'exposition au cadmium, particulièrement en France où les impacts sanitaires et les coûts associés sont majeurs.

Plus récemment (Anses, 2026), la troisième étude de l'alimentation totale (EAT3) montre que les dépassements de la DJT (de 0,35 $\mu\text{g (kg pc)}^{-1} \text{ j}^{-1}$) continuent d'être observés pour une proportion non négligeable de la population française, tant chez les enfants (23 – 27 % selon l'hypothèse de traitement de données censurées) que chez les adultes (1,4 – 1,7 % selon l'hypothèse de traitement de données censurées), traduisant des expositions qui méritent attention en termes de sécurité sanitaire. Ces éléments contextuels témoignent d'une situation préoccupante liée aux expositions actuelles au cadmium pour la population française.

Face à la situation préoccupante d'une forte imprégnation de la population française par le cadmium, et en préalable à l'identification d'options d'action, une évaluation intégrée de l'exposition humaine prenant en compte différentes sources et voies d'exposition au cadmium apparaît essentielle. C'est dans ce contexte qu'ont été réalisés les travaux du GT visant à répondre à plusieurs enjeux importants :

- (i) un enjeu sanitaire lié à la surexposition, avec à ce jour une imprégnation forte et croissante de la population française ;
- (ii) un enjeu scientifique, lié à une amélioration de l'évaluation des risques *via* un apport méthodologique s'appuyant sur une modélisation de l'exposition agrégée à partir des différentes sources et voies d'exposition au cadmium ;
- (iii) un enjeu socio-économique, lié au fardeau que représente le cadmium et l'importance d'identifier des options d'actions pour remédier au problème sanitaire du cadmium ;
- (iv) un enjeu institutionnel, correspondant au besoin de définir des orientations pour maîtriser le risque associé au cadmium.

La finalité de cette expertise a donc été de réaliser une évaluation intégrée de l'exposition humaine au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition sur la base d'une approche agrégée. Cette expertise visait à explorer la contribution des sources et voies d'exposition à l'imprégnation humaine au cadmium. Elle avait également vocation, par une analyse socio-économique, à identifier et prioriser des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

⁷ Human biomonitoring for Europe

3.2. Tendre vers une approche intégrée pour appréhender la problématique de santé publique liée au cadmium

Dans une approche intégrée des risques, il aurait été souhaitable de s'intéresser à l'ensemble des voies, sources et contextes d'exposition (y compris exposition professionnelle spécifique des travailleurs et exposition spécifique des autoproducteurs⁸ par exemple). Cependant, compte-tenu de la réalisation de cette expertise dans des délais contraints au regard des objectifs visés, il a été décidé de concentrer les travaux sur la population générale (adultes et enfants) française.

L'approche a consisté à caractériser l'exposition globale au cadmium en agrégeant différentes sources et voies d'exposition. Depuis leurs sources, les apports externes ont été reliés à l'imprégnation (dont l'indicateur choisi est la cadmiurie), en s'appuyant sur une modélisation des expositions au cours de la vie en intégrant la toxicocinétique du cadmium dans le corps humain. L'exposition agrégée au cadmium a été évaluée pour la population générale (infantile 0-3 ans, enfants et adultes) en distinguant - fumeurs et non-fumeurs.

A partir de l'approche méthodologique développée dans le cadre de cette expertise, les contributions des différentes sources et voies d'exposition à l'imprégnation humaine ont ainsi été déterminées. Une analyse des options d'action les plus pertinentes pour réduire l'imprégnation de la population au cadmium a été réalisée, à l'aide d'une analyse socio-économique.

La Figure 1 illustre le périmètre dans lequel a été réalisée cette expertise. Elle regroupe l'ensemble des étapes associées à chaque chapitre respectif du rapport accompagnant le présent avis, menant aux conclusions et recommandations.

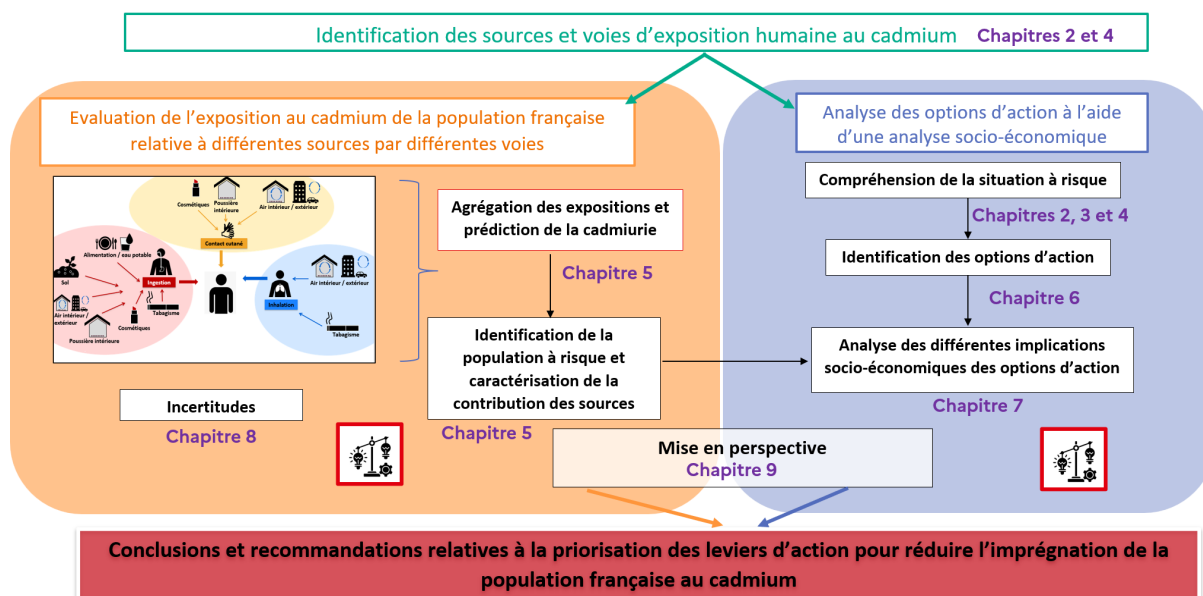


Figure 1. Représentation schématique du périmètre de l'expertise et correspondance des chapitres dans le rapport

⁸ Autoproducteurs : personnes produisant des denrées végétales ou animales pour leur propre consommation.

3.3. Identification des sources et voies d'exposition au cadmium pour la population générale

Une recherche bibliographique étendue de la littérature internationale, à l'aide de moteurs de recherche et de mots-clés, en privilégiant des données françaises ou par défaut européennes ou internationales, a permis de recenser les sources et voies d'exposition humaine au cadmium pertinentes à retenir pour la population générale (hors exposition professionnelle). Le chapitre 4 du rapport détaille les résultats de cette recherche.

Des origines naturelles et anthropiques du cadmium dans l'environnement ont été identifiées. Les sources naturelles de cadmium sont nombreuses. L'altération de nombreuses roches – phosphorites, sulfures métalliques, carbonatites, notamment – libèrent du cadmium dans les sols, et peut ainsi entraîner un transfert dans les autres compartiments de l'environnement. L'activité volcanique, l'envol de particules fines de sols, les feux de forêts, les embruns marins, ainsi que les dépôts de matière organique du sol (humus, litière, cadavres d'animaux...) constituent d'autres sources qui peuvent également contribuer à enrichir secondairement les sols en cadmium.

Parmi les sources anthropiques du cadmium, des sources en lien avec les activités agricoles et industrielles ont été recensées.

L'analyse de la littérature scientifique a permis d'identifier que les principales sources de cadmium liées aux activités agricoles incluent les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC)⁹ telles que les engrais minéraux (essentiellement engrais phosphatés), et les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) : effluents d'élevage, boues et autres bio-solides.

Quant aux sources d'origine industrielle, elles proviennent en général de l'industrie chimique et électrique, du traitement et du raffinage des métaux non ferreux, de la production et de l'utilisation d'accumulateurs nickel-cadmium, du traitement des surfaces métalliques (revêtement anticorrosion), de la métallurgie de l'acier, de la combustion du charbon et des produits pétroliers, des opérations d'exploitation minière et de traitement du minerai, de la fabrication et transformation de produits chimiques, des installations d'incinération des déchets, des industries aérospatiales et de défense, de la fabrication électronique, de céramique et de verre, de la production d'engrais, et des installations de recyclage des batteries (Brignon et al. 2017 ; CITEPA, 2023). Les activités industrielles émettant du cadmium ont évolué avec les réglementations, les technologies et les pratiques industrielles. Ces dernières décennies, en Europe et en France, les experts relèvent un renforcement des obligations réglementaires liées à l'usage industriel de cadmium, à son rejet dans l'environnement, et au traitement ou au recyclage des déchets contenant du cadmium.

⁹ Les « matières fertilisantes » sont des produits destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ou les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent, notamment :

- les engrais destinés à apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. Il peut s'agir d'éléments fertilisants majeurs (phosphore, azote, potassium...) ou secondaires ou encore d'oligo-éléments (magnésium, calcium...);
- les amendements destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols par l'apport de calcaire ou de matières organiques ;
- les matières, notamment les biostimulants dont la fonction, une fois appliquées au sol ou sur la plante, est de stimuler des processus naturels des plantes ou du sol, afin de faciliter ou de réguler l'absorption par celles-ci des éléments nutritifs, ou d'améliorer leur résistance aux stress abiotiques, ou d'améliorer les caractéristiques qualitatives de végétaux.

Les « supports de culture » sont des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux et à leur permettre, par ancrage de leurs organes absorbants, d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance.

(source : <https://www.anses.fr/fr/content/autorisation-de-mise-sur-le-marche-des-matieres-fertilisantes-des-adjuvants-pour-matieres-0#:~:text=Les%20mati%C3%A8res%20fertilisantes%20sont%20des,leur%20mise%20sur%20le%20march%C3%A9>).

Les rejets de cadmium dans l'environnement en lien avec les transports proviennent de l'abrasion de pièces métalliques, l'abrasion des pneus sur la chaussée, la remise en suspension des particules, la combustion du carburant. Les études sur les particules en suspension (PM10) dans les grandes villes montrent que le cadmium y est présent, mais les données spécifiques sur les particules PM1 et PM2.5 sont limitées.

Les émissions liées à l'industrie et au transport sont multiples, peuvent se superposer dans certaines zones, et contribuent aux pollutions diffuses en cadmium dans l'environnement.

L'ensemble de ces sources (industrie, transport, MFSC dont les engrais minéraux phosphatés, MAFOR) peuvent donc être à l'origine de la contamination de l'air, des sols, de l'eau, des denrées agricoles, et des aliments.

Ainsi, l'alimentation constitue une source importante d'exposition au cadmium de la population générale à considérer, notamment par l'intermédiaire de certains aliments identifiés comme contributeurs majeurs tels que les pains et produits de panification, pommes de terre et produits apparentés, et légumes (Anses, 2011 ; 2019 et 2025).

Le tabagisme est une source supplémentaire, bien documentée, d'exposition au cadmium. Le tabac est une plante exigeante en phosphore, et les engrais minéraux phosphatés, utilisés pour améliorer le rendement, sont une source de cadmium. Or, la plante de tabac est capable d'absorber fortement et d'accumuler dans ses feuilles le cadmium présent dans le sol (Pappas, 2011). Le cadmium figure dans plusieurs listes officielles de substances toxiques prioritaires associées aux produits du tabac. Il est ainsi classé parmi les 93 composants préoccupants identifiés par l'*US Food and Drug Administration* (FDA) dans les produits du tabac, ainsi que parmi les 39 substances de la liste de référence de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (WHO, 2015). Sur le plan réglementaire européen, l'oxyde de cadmium (forme inhalée par la fumée de cigarette) est considéré comme substance cancérigène par inhalation, mutagène ou toxique pour la reproduction (CMR), classée 1B pour la cancérogénicité, et 2 pour la mutagénicité et la reprotoxicité, conformément au règlement CLP (CE) n°1272/2008.

Compte tenu de la prévalence du tabagisme en France (18% de fumeurs quotidiens chez les adultes de 18-75 ans en France hexagonale en 2024), le tabac à fumer demeure une source essentielle à considérer dans l'évaluation de l'exposition au cadmium.

Toutes les sources précédemment citées peuvent engendrer la diffusion de particules en suspension (notées PM en anglais pour *Particulate Matter*) (PM) contaminées dans l'air, ainsi que de poussières. Ces particules ont été prises en compte dans la modélisation de l'exposition par l'air, l'eau et le sol, dans l'expertise.

Il a été aussi identifié que le cadmium pouvait être présent dans les produits cosmétiques. Le cadmium et ses composés faisant partie des substances listées en annexe II du Règlement (CE) n°1223/2009 du 30 novembre 2009 relatif aux produits cosmétiques, leur utilisation dans la formulation des produits cosmétiques présents sur le marché européen est interdite. Cependant, le cadmium et ses composés peuvent contaminer des produits contenant des pigments tels que les rouges à lèvres, les fonds de teint ou encore les fards à paupières (Gyamfi et al. 2024 ; Lara-Torres et al. 2021 ; Navarro-Tapia et al. 2021). Le règlement européen indique : « *la présence non intentionnelle d'une petite quantité d'une substance interdite, provenant d'impuretés issues d'ingrédients naturels ou synthétiques, du processus de fabrication, du stockage, de la migration de l'emballage, qui est techniquement inévitable dans de bonnes pratiques de fabrication, est permise à condition qu'elle soit conforme à*

l'article ». Compte tenu de données issues de la littérature¹⁰, les produits cosmétiques constituent une source de cadmium supplémentaire prise en compte dans la présente expertise.

Les matériaux en contact avec les denrées alimentaires (MCDA) ont également été identifiés comme une autre source potentielle d'exposition au cadmium pour l'Homme. Toutefois, la contribution des MCDA à l'exposition du consommateur apparaît comme faible en France au regard des résultats des contrôles officiels réalisés par la DGCCRF. Bien qu'elle puisse constituer une source d'exposition supplémentaire de l'Homme au cadmium, les informations disponibles au niveau français ne permettent pas de prendre cette source en considération dans la modélisation de l'exposition dans la présente expertise.

Ces éléments illustrent le caractère multifactoriel de l'exposition de la population générale au cadmium et l'intérêt d'étudier cette exposition en France en agrégeant la diversité des sources et voies impliquées.

La Figure 2 présente un schéma conceptuel listant l'ensemble des sources et voies d'exposition humaine au cadmium retenues pour la suite de l'expertise.

Sur la base des données collectées, les différentes sources d'exposition par différentes voies retenues pour le calcul d'agrégation sont les suivantes :

- ingestion d'aliments/eau potable, ingestion de poussières intérieures sédimentées, exposition du fumeur aux fumées par ingestion, ingestion de cosmétiques, ingestion de sol, ingestion de particules (PM10) de l'air intérieur et extérieur ;
- inhalation de particules (PM 10) de l'air intérieur et extérieur, exposition du fumeur aux fumées par inhalation ;
- contact cutané avec les poussières intérieures, contact cutané avec l'air intérieur et extérieur, contact cutané par les produits cosmétiques.

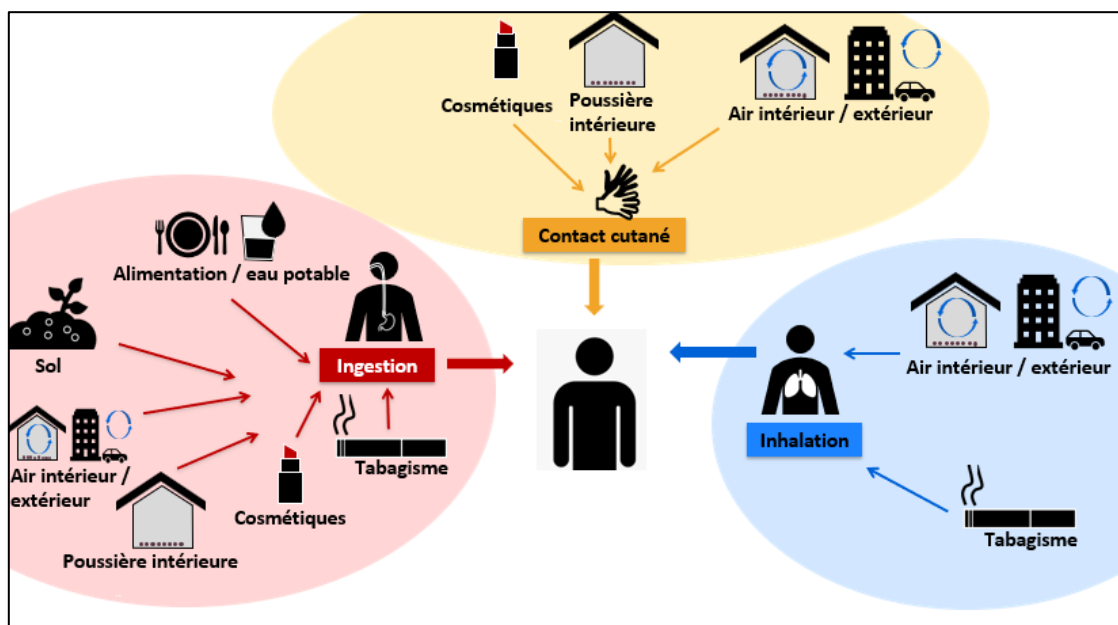


Figure 2. Schéma conceptuel relatif aux sources et voies d'exposition humaine au cadmium retenues pour la suite de l'expertise

¹⁰ Données collectées et organisées en base de données dans le cadre de PARC.

3.4. Démarche d'agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie et analyse des déterminants des expositions pour la population générale française

La démarche générale est présentée dans la Figure 3. L'approche méthodologique est expliquée en détail dans le chapitre 5 du rapport.

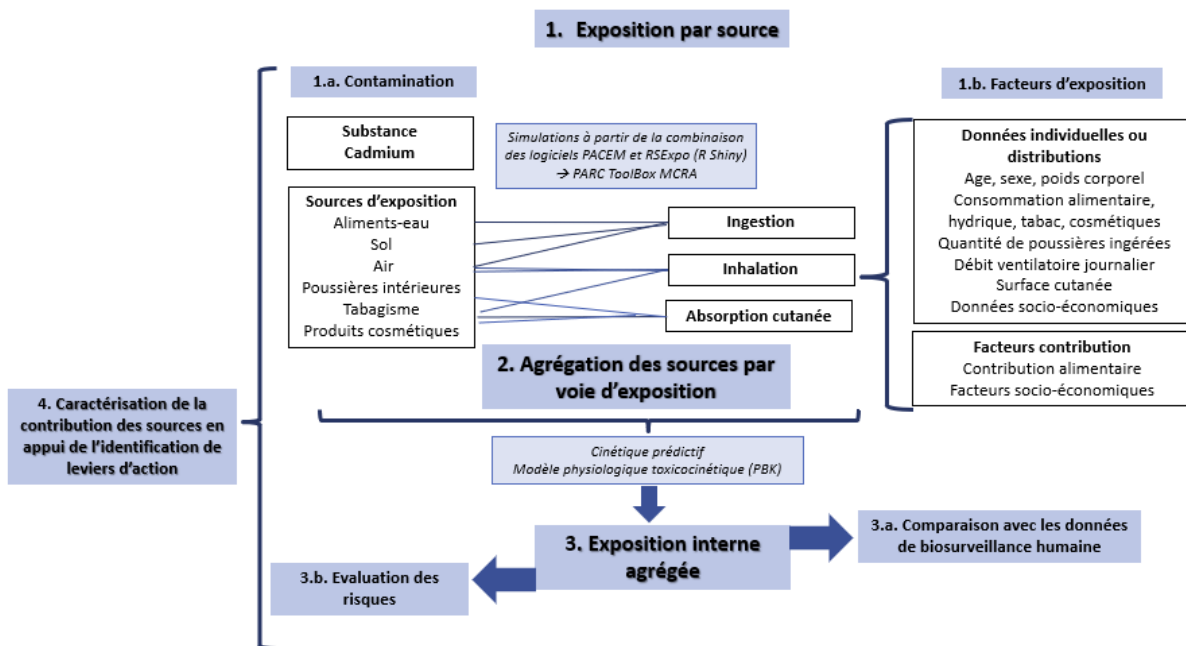


Figure 3. Schéma conceptuel de l'agrégation des sources et voies d'exposition au cadmium, de la prédiction du cadmium urinaire et de l'évaluation de la contribution des sources à l'imprégnation pour la population générale adulte et enfant.

Au préalable, une analyse des déterminants socio-démographiques pouvant impacter l'exposition au cadmium a été conduite à partir des données d'exposition alimentaire d'une part, et des données de l'imprégnation humaine en cadmium de l'étude Esteban d'autre part (Oleko et al. 2021). Les variables identifiées (variables de stratification) ont ensuite été utilisées afin d'agréger les expositions provenant des différentes sources et voies, comme expliqué ci-après.

Les différentes sources retenues relatives à l'alimentation, à l'eau de boisson, aux sols, à l'air, aux poussières sédimentées en milieu intérieur, au tabagisme et aux produits cosmétiques ont été agrégées avec les différentes voies d'exposition (par ingestion, par inhalation et cutanée). La Figure 4 associe les variables et données retenues par source et voie d'exposition pour calculer les expositions.

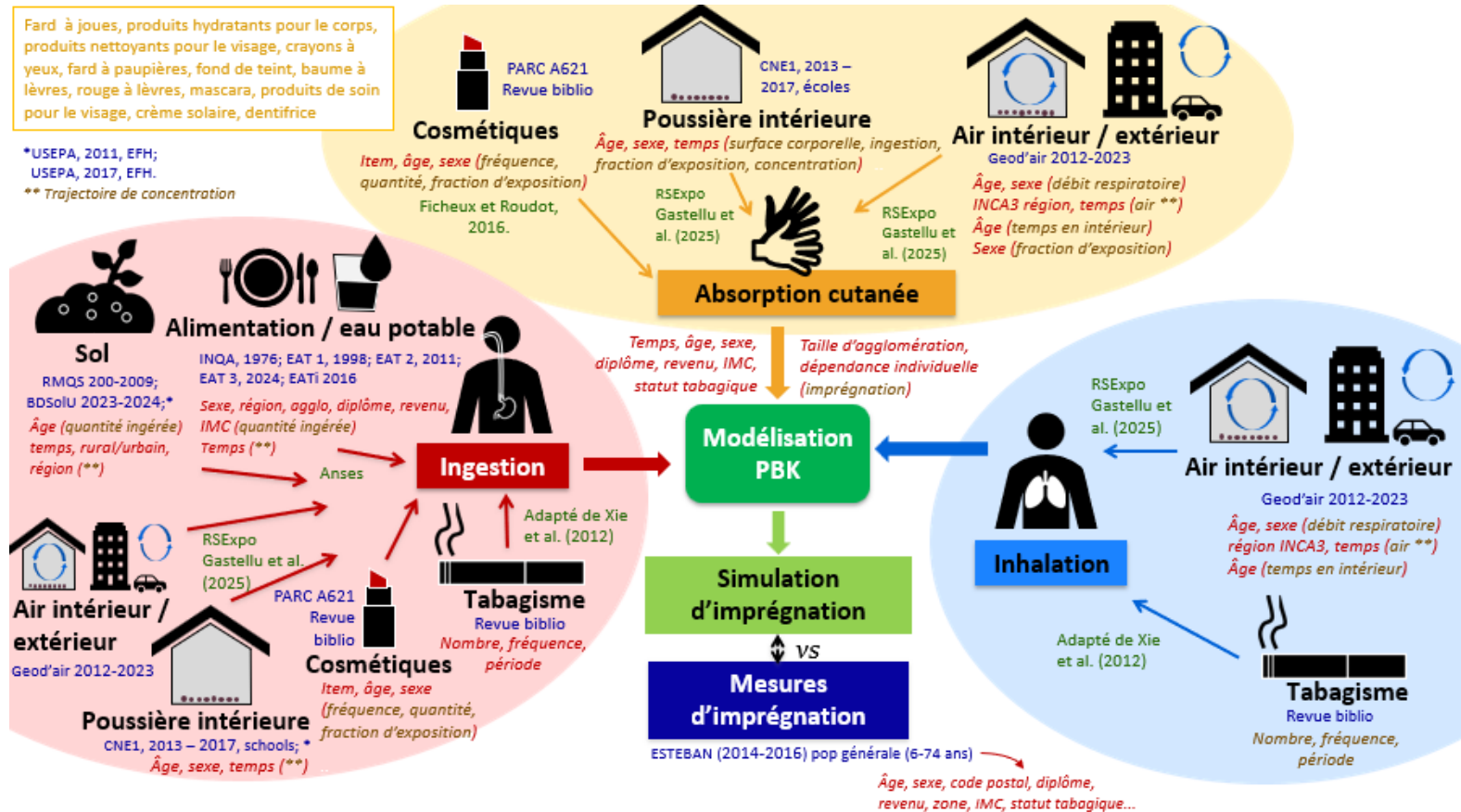


Figure 4. Variables, sources de données et modèles retenus pour estimer et agréger les sources et voies d'exposition liées au cadmium pour la population générale française des adultes (≥ 18 ans) et des enfants (0-17 ans). La couleur de la police correspond à : rouge : variable de stratification ; doré : facteur d'exposition ; bleu : sources de données ; vert : modèle d'exposition.

L'agrégation des expositions a nécessité de combiner les expositions calculées par source et par voie à partir de variables et de jeux de données différentes comme indiqué dans la Figure 4. Pour combiner des expositions qui proviennent d'enquêtes diverses, la méthode proposée par Vanacker et al. (2020), reposant sur des simulations statistiques Monte-Carlo à deux dimensions, a été utilisée. Cette méthode consiste à définir une population de référence représentative de la population cible, ainsi que des variables de stratification ayant un impact potentiel sur les expositions au cadmium. Ici, la population de référence est basée sur la population de l'étude Esteban représentative de la population française (entre 6 ans et 74 ans inclus) et fournissant les données d'imprégnation (Oleko et al. 2021). Pour les enfants de moins de 6 ans et les individus de plus de 74 ans, non inclus dans l'étude Esteban, des individus sont simulés à partir des données de l'INSEE en reproduisant la structure de la population française en termes d'âge et de sexe. Les variables de stratification sont, en plus de l'Indice de masse corporelle IMC (le poids corporel impactant *de facto* les expositions), celles identifiées comme significatives lors de l'analyse des déterminants de l'exposition effectuée à partir des imprégnations de l'étude Esteban et des expositions alimentaires, ainsi que des variables nécessaires au calcul de certaines sources. Ces variables sont selon les sources l'âge, le sexe, le diplôme, le statut tabagique, la région, l'environnement de vie rural/urbain, la taille de l'agglomération, la temporalité d'exposition, comme illustré dans la Figure 4. Ensuite, pour chacun des 3949 individus de l'étude Esteban et des individus supplémentaires simulés, une trajectoire d'exposition de leur naissance à 100 ans a été modélisée en procédant à un tirage aléatoire des valeurs dans les distributions des facteurs d'exposition et dans les données de concentrations pour calculer des expositions par source et voie selon des âges pivots (présentés ci-après). Pour simuler l'évolution des expositions au cours du temps pour un individu donné, de nouvelles valeurs sont attribuées à chaque nouvel âge pivot. Ces valeurs restent ensuite constantes dans l'intervalle de temps entre deux âges pivots. Les âges pivots retenus sont : naissance, 1 mois, 3 mois, 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans, 6 ans, 11 ans, 15 ans, 18 ans, 30 ans, 45 ans, 65 ans et 80 ans. Ainsi, par exemple, entre 11 ans et 15 ans (non inclus), l'exposition journalière d'un individu est calculée à partir d'un tirage dans les distributions relatives aux différentes sources. Les mêmes valeurs journalières sont utilisées pendant toute la durée de cette tranche d'âge. A partir de 15 ans, des nouvelles valeurs sont tirées à partir des distributions correspondantes et sont utilisées pour cette nouvelle tranche d'âges (15 ans -18 ans).

Afin de tenir compte de l'incertitude liée à la combinaison des données, ce processus est répété 1000 fois par individu, créant ainsi 1000 jeux de données de 3949 individus. Ces trajectoires d'exposition sont ensuite utilisées dans le modèle de toxicocinétique à base physiologique (PBK) décrit ci-après afin d'agréger les voies d'exposition, modéliser la toxicocinétique au cours de la vie, et obtenir finalement les cadmiuries calculées (imprégnations prédites) et les contributions par source et voie d'exposition. A partir de chacune des populations simulées, des statistiques (moyenne, médiane, quantiles) des variables de sortie, comme l'imprégnation prédite, sont calculées. Les résultats sont ensuite exprimés en utilisant la médiane (Q50) des 1000 valeurs obtenues pour chacune des statistiques (moyenne, médiane, quantiles) et un intervalle d'incertitude à 95% dont les bornes sont définies par les quantiles Q2,5 et Q97,5.

Le modèle (PBK) utilisé pour modéliser la toxicocinétique du cadmium est basé sur le modèle original proposé par Kjellström et Nordberg (1978). Ce modèle PBK permet de simuler l'absorption du cadmium par la voie orale et respiratoire. Il permet de modéliser l'accumulation du cadmium dans l'organisme et son élimination par les urines. Il s'agit d'un modèle à 8 compartiments comprenant les poumons, le tractus gastro-intestinal, le sang (plasma, érythrocytes et métallothionéines), le foie, les reins et un compartiment pour les « autres tissus ». Ce modèle validé par l'Anses a permis de dériver une Valeur Toxicologique de Référence (VTR) à long terme par voie respiratoire et voie orale (Anses, 2012 ; 2019). Dans le cadre de ce travail, l'exposition au cadmium avant la naissance (utilisation de la concentration massique de cadmium dans le sang de cordon ombilical pour simuler celle dans le sang à la naissance) et l'intégration de l'exposition par la voie cutanée (un facteur d'absorption de 0,5% est appliqué à la quantité d'exposition cutanée pour dériver celle distribuée dans le plasma), ont été ajoutées.

In fine, les cadmiuries ont été simulées à partir des expositions externes pour chaque couple source-voie, permettant de tenir compte des trajectoires d'exposition au cours de la vie.

Afin de vérifier la plausibilité des scénarios d'exposition retenus, les cadmiuries prédites ont ensuite été comparées à celles mesurées dans l'étude Esteban (Oleko et al. 2021) : d'une part à l'aide de fonctions de répartition des lois populationnelles de cadmiurie, et d'autre part à partir de statistiques calculés sur la distribution populationnelle des ratios individuels de cadmiurie prédite sur cadmiurie mesurée.

Le pourcentage de la population générale française exposée à un risque a ensuite été estimé en calculant le pourcentage d'individus par tranche d'âge ayant des cadmiuries simulées en 2025 supérieures aux valeurs sanitaires de référence. En l'état actuel des connaissances, la valeur toxicologique de référence (VTR) interne de $0,5 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine (Anses, 2019) est la valeur la plus récente et la plus robuste, quelles que soient les voies d'exposition pour la population générale qui comprend des fumeurs et des non-fumeurs. Cette VTR interne correspond à la concentration critique interne dérivée à partir d'études épidémiologiques faisant le lien entre la survenue d'effets osseux (identifiés comme l'effet critique) et l'exposition au cadmium chez une population suédoise âgée de plus de 60 ans (Engstrom et al. 2011 ; 2012 et Wallin et al. 2016). Afin de tenir compte de l'exposition cumulative en lien avec la longue demi-vie du cadmium, l'Anses (2019) a estimé l'évolution de la concentration urinaire de cadmium à ne pas dépasser (Valeurs Repères Biologiques), dès la naissance et par âge, afin d'éviter de dépasser la VTR interne ($0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) à l'âge de 60 ans.

Les cadmiuries prédites ont ainsi été comparées à :

- 1- la valeur toxicologique de référence interne (VTR interne) de $0,5 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine, appliquée pour tous les individus quel que soit leur âge ;
- 2- la trajectoire de valeurs repères biologiques (VRB) par âge.

Puis, la contribution relative des différentes sources (par voies d'exposition) à l'imprégnation a été caractérisée.

La Figure 5 rappelle de façon conceptuelle la méthodologie développée dans cette expertise.

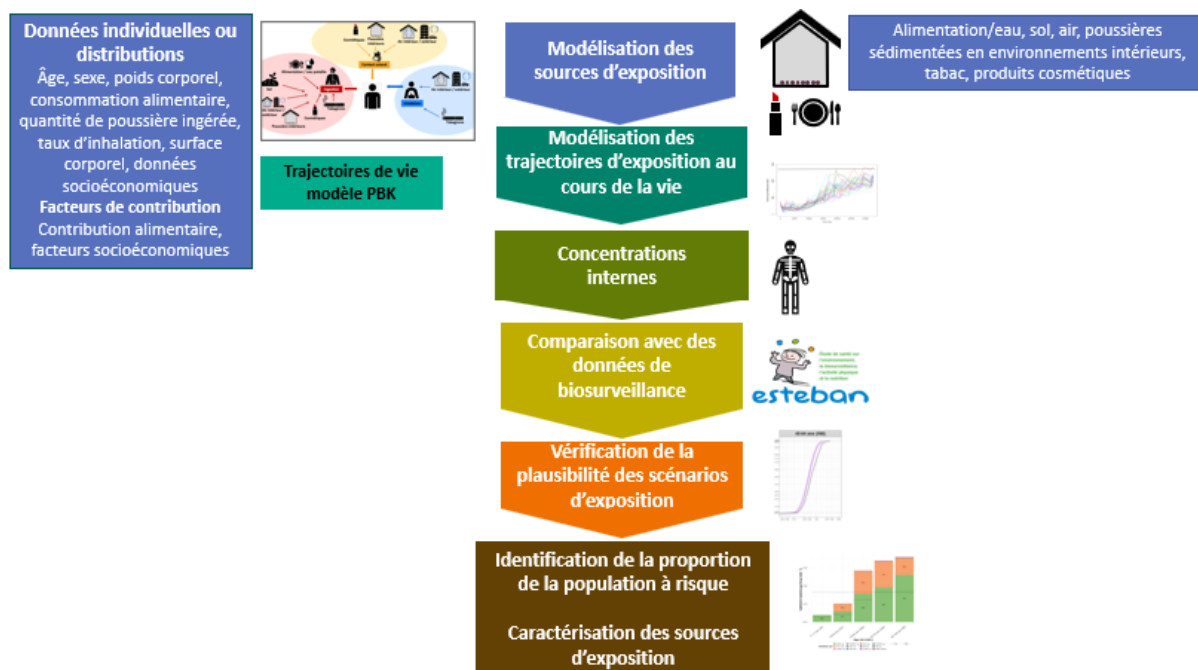


Figure 5. Schéma conceptuel de la démarche mise en œuvre

3.5. Démarche d'identification et d'analyse ciblée des options d'action à l'aide d'une analyse socio-économique

En suivant le référentiel méthodologique d'analyse socio-économique d'options d'action (ASEOA) de l'Anses¹¹, une démarche en quatre étapes a été suivie :

- 1) Compréhension de la situation à risque, s'appuyant sur les travaux d'identification des sources et voies d'exposition et de caractérisation de la contribution des sources à l'imprégnation selon une exposition agrégée ;
- 2) Identification des options d'action ;
- 3) Analyse des différentes implications socio-économiques des options d'action ;
- 4) Mise en perspective des options d'action analysées.

En tenant compte de l'étude de la situation à risque (cf. sections 3.3 et 3.4), une pluralité de mesures existantes ou discutées dans la littérature a été identifiée pour maîtriser les risques liés à l'exposition de la population générale au cadmium. Ceci renvoie plus spécifiquement à la deuxième étape du référentiel méthodologique (chapitre 6 du rapport).

Une catégorisation des options en plusieurs domaines a été proposée à partir d'une analyse de la littérature en fonction des sources et voies d'exposition et des pistes de prévention identifiées :

- les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine et les matériaux au contact des denrées alimentaires ;
- les intrants et activités agricoles, activités aquacoles et la pêche ;
- les activités industrielles, liées aux services, celles liées aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage ;

¹¹ Version endossée par le CES ASE le 30 Mai 2024 (phase test).

- les produits du tabac ;
- la prévention secondaire¹² et la prise en charge des individus exposés¹³.

Une synthèse d'informations générales relatives à chaque option d'action a été produite (mesures déjà appliquées à l'international, en Europe, en France, travaux sur le sujet, recommandations émises par des institutions scientifiques...).

A partir de cette synthèse, et considérant le périmètre de l'expertise ainsi que les résultats de la modélisation de l'exposition agrégée, le GT a sélectionné les cibles et options d'action d'intérêt particulier (réglementation, information, incitation...) afin d'en analyser les impacts potentiels sur les sources et voies d'exposition de la population, en tenant compte des enjeux associés à leur mise en œuvre (faisabilité, coût).

Pour cela, en lien avec la troisième étape du référentiel méthodologique ASEOA, une analyse aussi documentée que possible de chaque option d'action a été menée, sans qu'il s'agisse toutefois de réaliser une analyse quantitative comparant tous les impacts de chaque option. En effet, dans le délai imparti, mais aussi compte tenu du manque de données nécessaires pour identifier, documenter, quantifier ces impacts, voire leur attribuer une valeur monétaire, il est apparu plus pertinent de proposer une analyse documentaire des cibles d'action et une synthèse de connaissances sur les principales implications des options d'action associées, en prenant appui sur des données quantitatives ou qualitatives disponibles. Ce travail vise ainsi à éclairer les acteurs concernés dans le choix des options d'action à mettre en place.

Pour cela, une consultation et une analyse thématique d'une diversité de sources d'informations scientifiques et contextuelles ont été menées, permettant d'apprécier les impacts potentiels et les enjeux de mise en œuvre de ces différentes options d'action en France.

L'analyse s'est appuyée en premier lieu sur des données scientifiques formalisées (articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, rapports d'agences ou d'institutions nationales et internationales), ainsi que sur la littérature grise, et sur des données et questionnements portés par des parties-prenantes à partir de leurs expériences (auditions de différents acteurs des organisations citées en section 2). Il a été porté attention aux effets des options d'action documentés dans la littérature, et aussi au contexte dans lequel les options d'action sont ou seraient déployées en France (ex. types d'acteurs, de territoires...), contexte participant de leur pertinence et de leur applicabilité.

Enfin, les options d'action analysées ont été mises en perspective selon la dernière étape du référentiel méthodologique, afin de prioriser les recommandations.

3.6. Synthèse et conclusions de l'expertise

3.6.1. Une avancée méthodologique reliant les différentes voies et sources d'exposition avec l'imprégnation humaine

La présente expertise a permis d'explorer de manière inédite le lien entre l'imprégnation humaine au cadmium et un nombre conséquent de voies et sources d'exposition en intégrant diverses composantes : multi-sources, multi-voies, dynamiques d'exposition pour l'ensemble

¹² La prévention secondaire vise à détecter précocement les maladies existantes afin de stopper ou de retarder la progression de la maladie et ses effets, par exemple grâce au dépistage et à d'autres programmes de détection précoce tels que les bilans de santé de routine (traduit de OMS, 2021 : <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/96da8799-4938-4d66-b171-04770ed4b243/content>)

¹³ La prévention secondaire et la prise en charge des individus relevant d'une expertise biomédicale (hors champ de compétence du GT), ce domaine d'action n'a pas été approfondi dans le cadre de l'expertise.

de la population de la période prénatale à l'âge de 100 ans, facteurs socio-économiques. Bien que la co-exposition avec d'autres substances ne soit pas couverte dans cette expertise, cette démarche s'inspire du concept d'exposome¹⁴ et constitue une avancée méthodologique importante. Elle permet d'évaluer pour la population générale française, adultes et enfants, l'exposition agrégée au cadmium et de modéliser la cadmiurie en fonction de l'âge des individus et ainsi d'anticiper la conséquence de mesures de gestion sur les trajectoires d'exposition. Une telle démarche pourra être transposée à d'autres contaminants. Elle a également permis d'analyser les déterminants majeurs de l'exposition humaine au cadmium et ainsi de caractériser les contributions par source et par voie d'exposition à l'imprégnation. Elle a permis aussi de tester l'utilisation de valeurs repères biologiques par classe d'âge afin de produire des indicateurs de risque par classe d'âge.

La comparaison entre les cadmiuries prédites par le modèle intégrant trajectoires d'exposition et toxicocinétique avec celles mesurées dans l'étude Esteban (cf figures 16, 17, 18, 19 et tableaux 11 et 12 du chapitre 5 dans le rapport), montre que le meilleur niveau de concordance entre les expositions prédites et observées est obtenu pour les classes d'âge 45-64 ans dans la population générale française non-fumeuse et fumeuse, et pour les 65-79 ans chez les fumeurs. Cependant, chez les individus adultes non-fumeurs de moins de 45 ans, les cadmiuries prédites sont sous-estimées en moyenne d'environ 40%. La population des enfants (6-17 ans) présente des valeurs prédites majoritairement plus faibles (d'environ 50% en moyenne) et moins dispersées que celles mesurées, reflétant une sous-estimation des expositions et de leur variabilité entre individus. Une telle sous-estimation a déjà été mentionnée dans la littérature pour ce type de modèle (Béchaux et al. 2014 ; Vanacker et al. 2020, Lamon et al. 2025). Plusieurs incertitudes peuvent expliquer cette sous-estimation des expositions par le modèle. D'une part, le modèle combine des données issues d'enquêtes distinctes, portant sur des individus de différentes populations, avec des temporalités et des méthodes de quantification différentes. D'autre part, les cadmiuries prédites ont été ensuite comparées à celles observées dans la population de l'étude Esteban, également différentes. Ainsi, le modèle ne peut donc reproduire finement les imprégnations. De plus, certaines sources d'exposition au cadmium n'ont pu être intégrées, faute de données ou d'identification, telles que le tabagisme passif, certains produits cosmétiques, les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, ou encore les activités professionnelles exposant au cadmium pour les adultes. Pour certains paramètres d'entrée du modèle (par exemple durée d'exposition aux poussières intérieures, nombre de cigarettes par jour), seules des valeurs ponctuelles ont pu être utilisées, limitant la caractérisation de leur variabilité. Aussi, il n'a pas été possible d'intégrer l'ensemble de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués. Il est également souligné qu'au cours de ces dernières décennies, la contamination par le cadmium a évolué (Béchaux et al. 2014). Même si le modèle de trajectoire d'exposition prend en compte plusieurs enquêtes alimentaires conduites au cours du temps et certains facteurs environnementaux (sol, poussières...), il ne peut pas reproduire parfaitement cette évolution.

Pour les enfants, la sous-estimation de la cadmiurie prédite pourrait être liée à l'incertitude autour de la charge en cadmium à la naissance, ou encore à l'absence de prise en compte du tabagisme de la mère, qui n'est pas intégré dans le modèle.

¹⁴ L'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques et physiques, en interaction avec le statut physiologique, le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception jusqu'à la fin de sa vie, afin d'expliquer son état de santé (Anses, 2023).

D'autres incertitudes, décrites dans le chapitre 8 du rapport et liées au manque de connaissances et de données, peuvent également expliquer les écarts observés entre les cadmiuries prédites et mesurées dans la population de l'étude Esteban. Dans le futur, certaines de ces incertitudes pourraient être réduites et la variabilité mieux caractérisée.

In fine, les résultats indiquent une bonne adéquation entre les distributions d'expositions prédites et observées des individus fumeurs de plus de 45 ans. Pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs modélisées sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés.

Néanmoins, adaptée à la complexité et aux incertitudes inhérentes aux données, l'approche développée dans cette expertise est un support à l'amélioration de la compréhension des sources d'exposition à l'imprégnation au cadmium et a permis d'orienter les priorités d'action.

La présente expertise se distingue par sa position à l'interface entre une expertise motivée par une problématique de santé publique, et une démarche de recherche menée dans le cadre du partenariat européen PARC où elle constitue un cas d'étude pour la co-construction d'une méthode d'évaluation de l'exposition agrégée.

3.6.2. Situation de risque sanitaire lié au cadmium : l'alimentation comme source d'exposition principale

Les Figure 6, Figure 7, Figure 8 présentent sous forme d'histogramme en 2025 la cadmiurie moyenne prédite en $\mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine par classe d'âge, le pourcentage de contribution des couples source-voie d'exposition, pour respectivement la population générale non fumeuse, les enfants de moins de 12 mois, et la population générale fumeuse. Les VRB par classe d'âge (représentées par la ligne en tiret), de façon à ne pas dépasser la VTR interne à l'âge de 60 ans (représentée en trait plein), permettent d'observer que dès la naissance, les imprégnations moyennes simulées à partir de différentes sources et voies d'exposition dépassent la VRB. Pour rappel, les résultats modélisés sous-estiment la cadmiurie. Cette comparaison indique à l'échelle populationnelle une possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé.

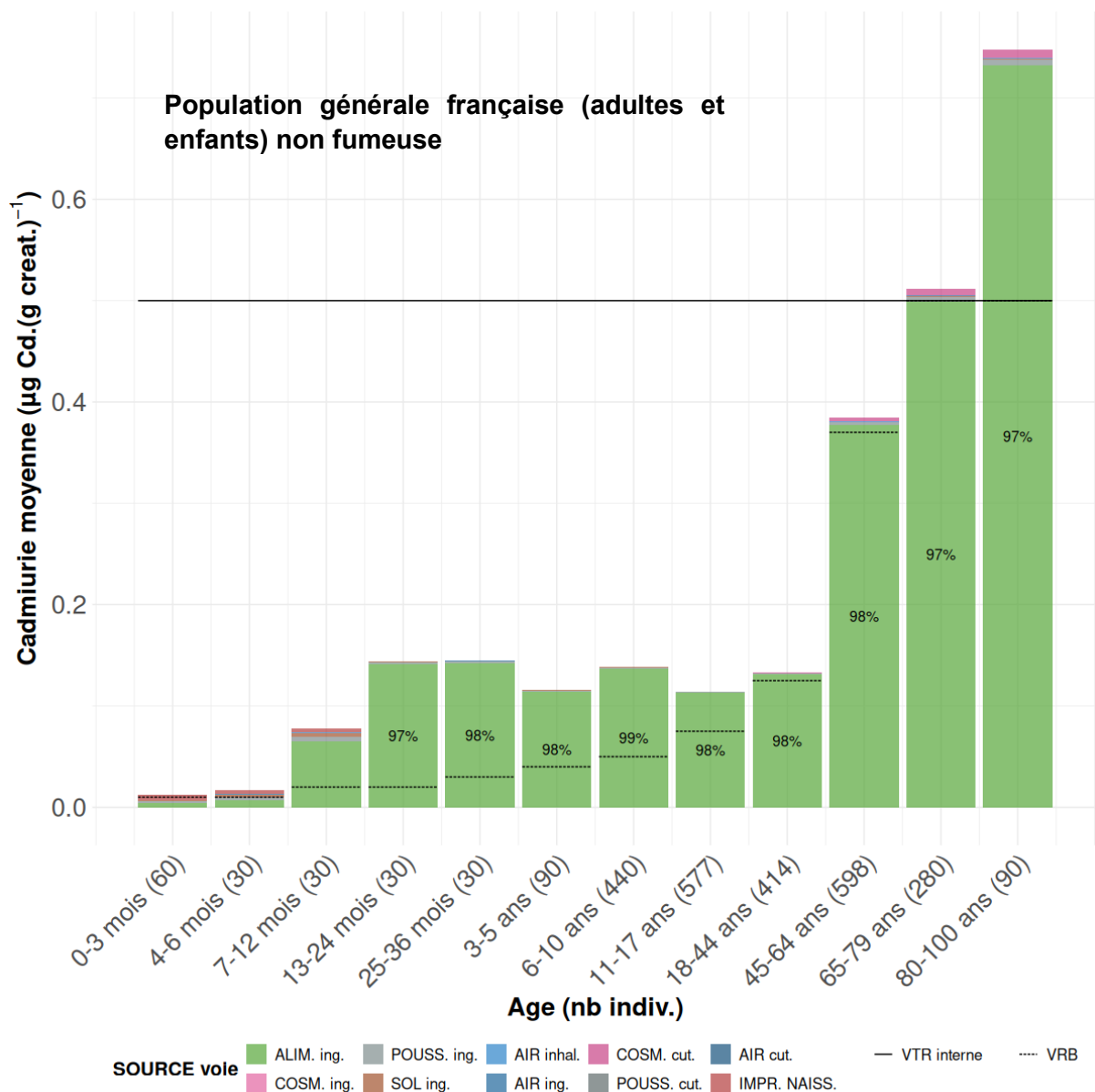


Figure 6. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale non fumeuse par classe d'âge et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 populations simulées). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; COSM. cut. : exposition par contact cutané aux cosmétiques ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; COSM. ing. : exposition par ingestion de produits cosmétiques ; POUSS. cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la valeur repère biologique, (VRB) pour la classe d'âge considérée. La ligne pleine noire indique la valeur toxicologique de référence interne (VTR interne).

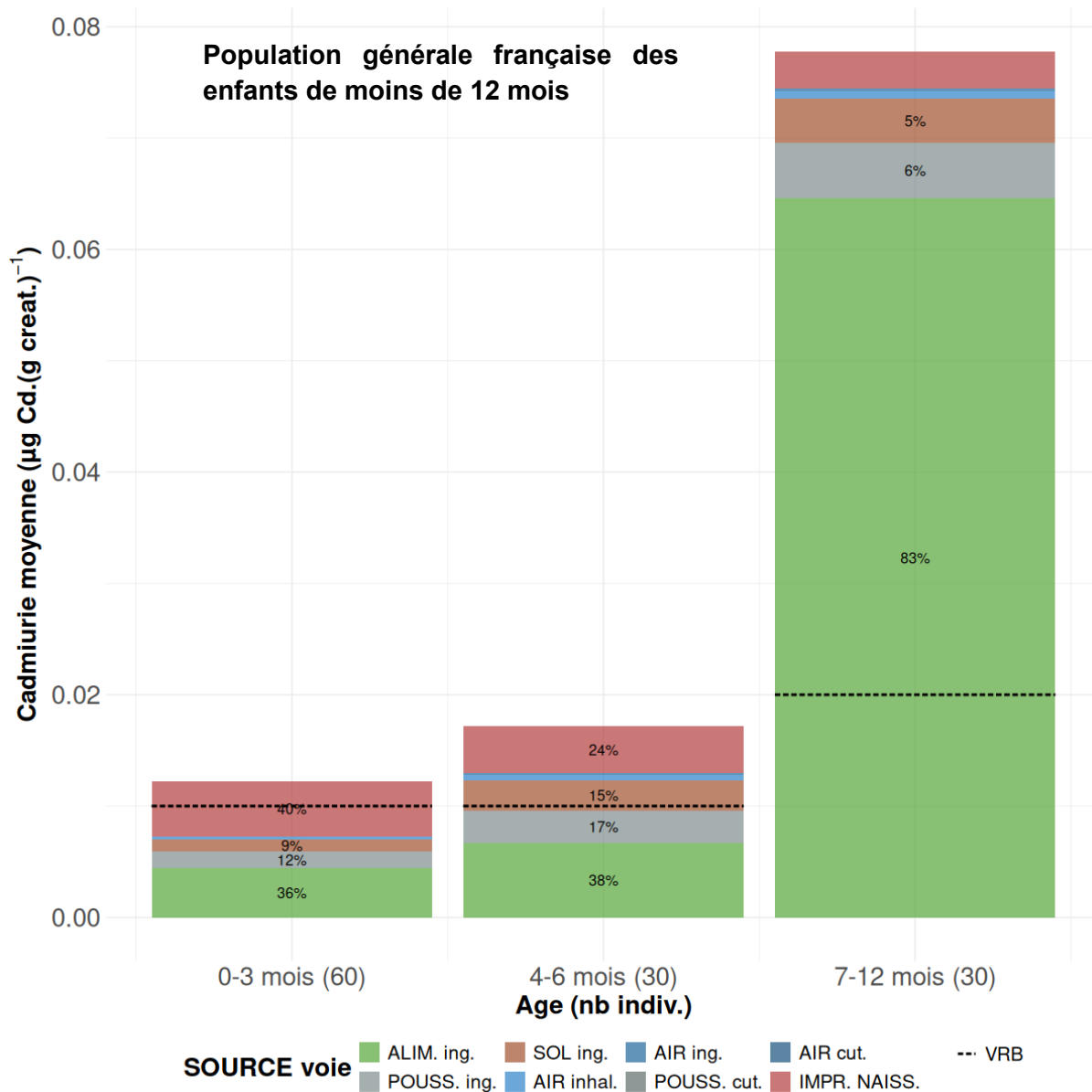


Figure 7. Cadmiurie moyenne prédite des enfants de moins de 12 mois par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 populations simulées). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : Exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; POUSS cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la valeur repère biologique (VRB) pour la classe d'âge considérée.

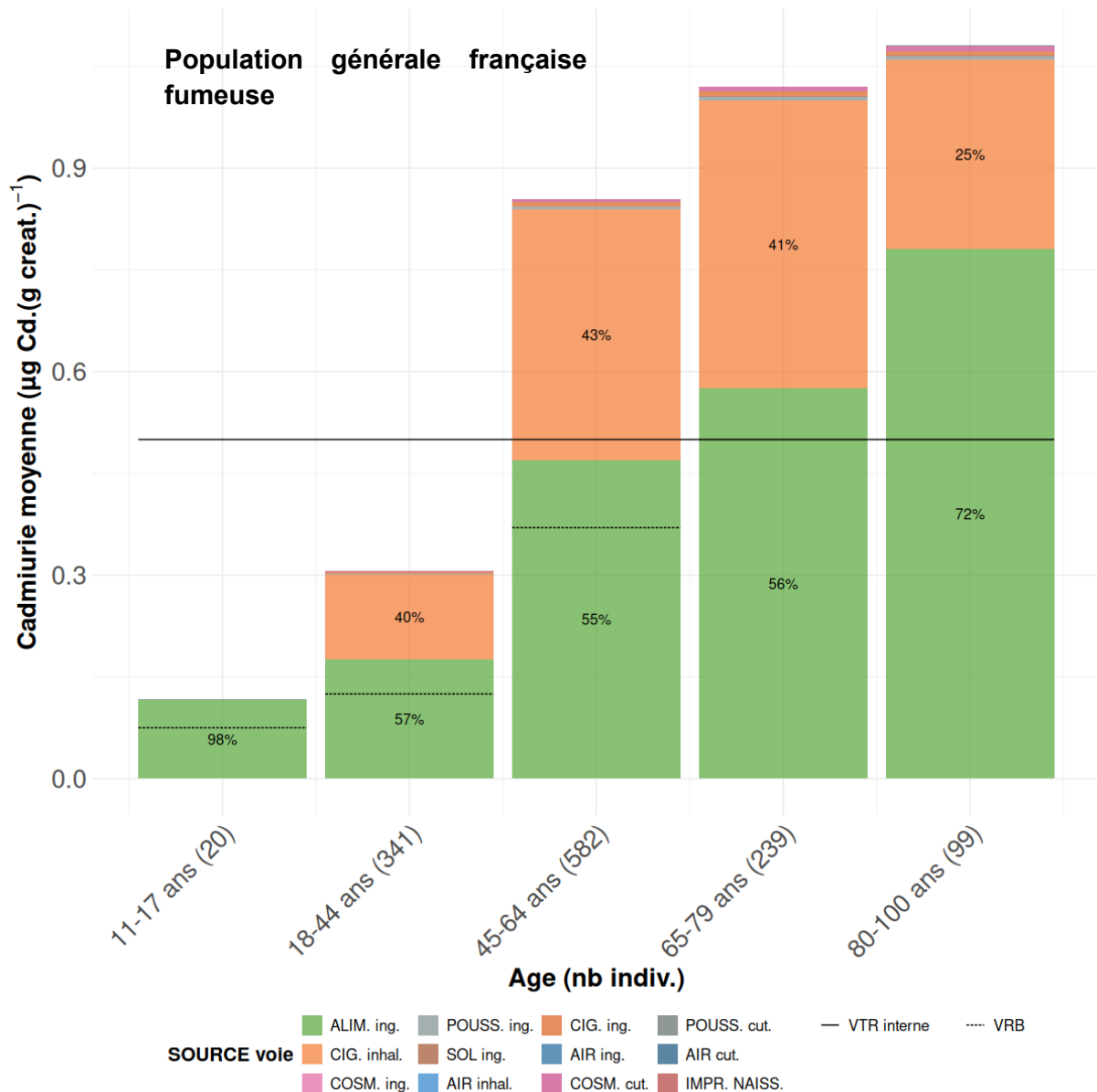


Figure 8. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale française¹⁵ fumeuse par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 jeux de données). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; CIG. Inhal : inhalation de fumée de cigarette par le fumeur ; COSM cut. : exposition par contact cutané aux cosmétiques ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : Exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; CIG. ing. : ingestion de fumée de cigarette par le fumeur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; COSM ing. : exposition par ingestion de produits cosmétiques ; POUSS cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la valeur repère biologique, (VRB) pour la classe d'âge considérée. La ligne pleine noire indique la valeur toxicologique de référence interne (VTR interne).

¹⁵ Les catégories d'âge de la population fumeuse présentées sur la figure 8 sont issues de l'étude Esteban.

Les résultats montrent une cadmiurie augmentant avec l'âge de la population, en lien avec le potentiel bioaccumulable du cadmium et la chronicité des expositions actuelles sur la vie entière. Ils indiquent qu'une part de la population est à risque, avec une imprégnation au cadmium préoccupante à tout âge, et cela dès le plus jeune âge.

Les cadmiuries estimées par tranche d'âge en 2025 présentent des dépassements des VRB fixées par classe d'âge, pour une fraction de chaque catégorie de la population française, fumeuse et non fumeuse (à titre indicatif : dépassement de 33% des 0-3 mois à 100% pour les 25-36 mois) et les adultes (49 % des 18-44 ans, 59% des 45-64 ans et 54 % des 65-79 ans) (les données sont détaillées dans les tableaux 13, 14 et 15 dans le chapitre 5 du rapport). Les dépassements pour la population non fumeuse en 2025 sont également illustrés dans la Figure 9 présentant la distribution des cadmiuries prédites par classe d'âge.

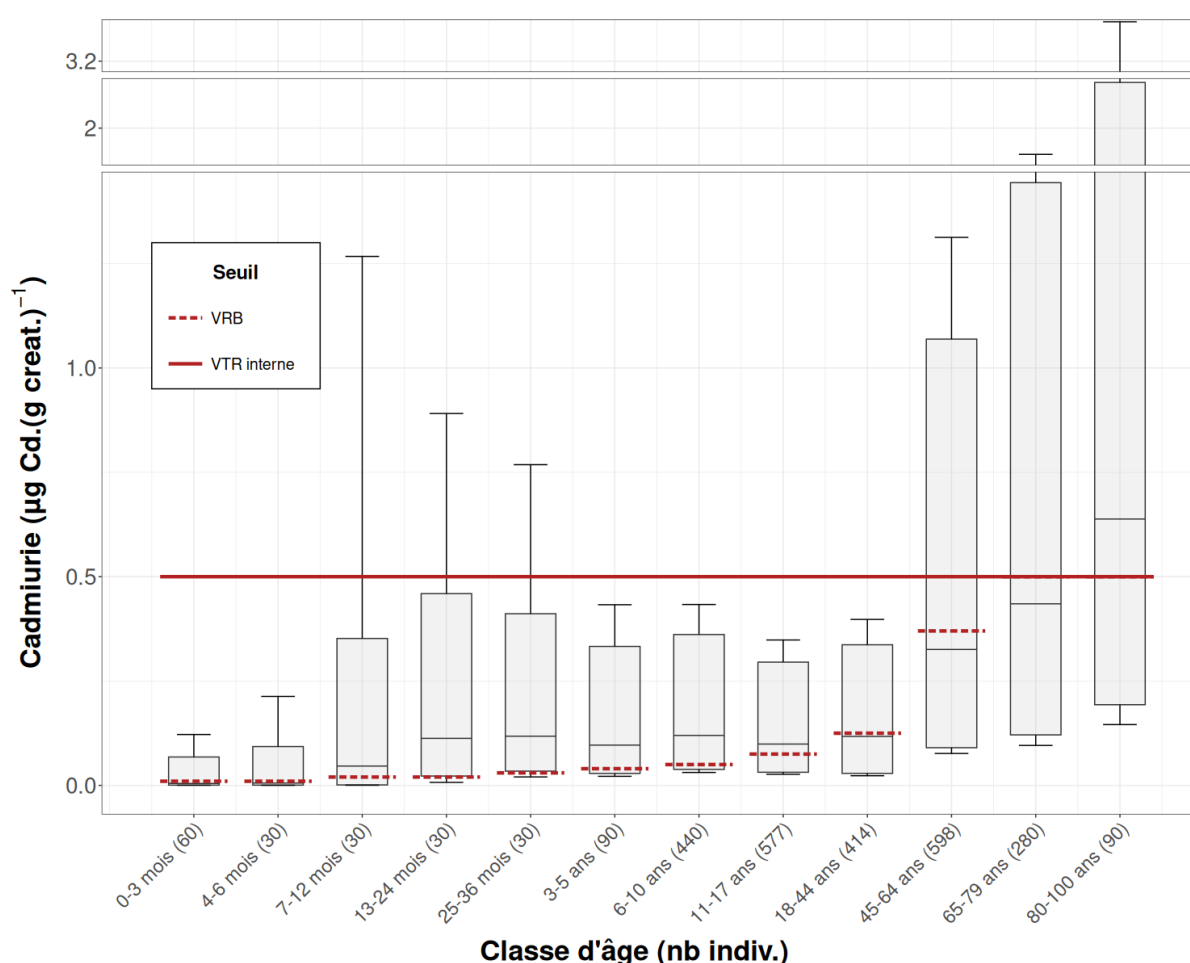


Figure 9. Distribution de la cadmiurie prédite de la population générale non fumeuse par classe d'âge en 2025. La ligne en pointillés de couleur rouge représente la valeur repère biologique (VRB) pour la classe d'âge considérée. La ligne pleine de couleur rouge indique la valeur toxicologique de référence interne (VTR interne). La VRB vaut pour les classes d'âge inférieures à 60 ans d'où l'absence de repère VRB sur la figure pour les classes d'âge supérieures.

Aux niveaux d'exposition actuels, et s'ils se maintiennent dans le temps, de tels dépassements indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé. Ces résultats du modèle confirment et complètent les mesures précédemment obtenues dans les évaluations de l'Anses effectuées à partir des expositions alimentaires des EAT qui concluent à l'existence d'un risque lié à l'exposition au cadmium dans une partie de la

population. Ces résultats confortent également ceux de Santé publique France relatifs aux imprégnations mesurées dans l'étude Esteban qui montrent des dépassements de valeurs guides sanitaires pour près de la moitié de la population adulte française. Il en ressort une nécessité de prioriser des options d'action pour limiter l'imprégnation humaine au cadmium, en particulier au regard de son accumulation dans l'organisme au cours de la vie.

Cette expertise confirme que l'alimentation est la source majeure de l'imprégnation humaine au cadmium tout au long de la vie pour la population générale (cf Figure 6, Figure 7, Figure 8).

Chez les enfants de moins de 12 mois, l'exposition provient majoritairement de l'ingestion d'aliments, bien que d'autres sources minoritaires participent également à l'imprégnation, notamment l'ingestion de poussières et de sols. L'exposition prénatale au cadmium — bien que partiellement limitée par la barrière placentaire — se poursuit *post partum* ; l'imprégnation est significative pendant les six premiers mois de vie. Cette exposition prénatale explique jusqu'à 40% de l'imprégnation observée sur les trois premiers mois de vie, et diminue à 24% entre 3 et 6 mois, du fait de l'exposition à de nouvelles sources. L'exposition prénatale constitue une fenêtre de sensibilité particulière vis à vis des effets sur le développement (Anses, 2019).

Chez les enfants âgés de plus de 12 mois jusqu'à 17 ans et les adultes non-fumeurs, l'alimentation est la source majeure, expliquant jusqu'à 98 % de l'imprégnation au cadmium.

Chez les fumeurs, l'inhalation de fumée de tabac est une autre source importante d'exposition. La source tabagique contribue à l'imprégnation particulièrement pour les individus à partir de la quarantaine. Chez les 45-64 ans, elle peut représenter jusqu'à 43 % de l'imprégnation, tandis que l'alimentation reste la principale source avec une contribution allant jusqu'à 55 %. En tenant compte de leur consommation tabagique actuelle et(ou) passée et sans considérer le tabagisme passif, une cadmiurie plus élevée est observée chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs, avec des niveaux presque doublés à partir de 45 ans. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude Esteban (Oleko et al. 2021), qui rapportent une imprégnation augmentée de 53,6 % chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs. Il est de plus observé que la proportion d'individus dépassant les VRB par classe d'âge chez les fumeurs est plus élevée que dans la population générale non-fumeuse, soit 71 % pour les 18-44 ans et 76 % pour les 45-64 ans chez les fumeurs, contre 29 % pour les 18-44 ans et 42% pour les 45-64 ans chez les non-fumeurs (cf. tableaux 13, 14 et 15 dans le chapitre 5 du rapport). Le tabagisme est confirmé comme un facteur d'exposition aggravant, augmentant la cadmiurie et favorisant le dépassement des VRB.

Une analyse plus détaillée des groupes d'aliments les plus contributeurs à l'imprégnation a été effectuée.

La contribution moyenne des groupes d'aliments à l'imprégnation humaine au cadmium, par classe d'âge pour la population générale française, est illustrée en Figure 10.

Avant l'âge de 7 mois, les préparations infantiles de 1^{er} âge constituent la principale source alimentaire à l'imprégnation humaine au cadmium, suivies des céréales infantiles.

Chez les enfants de 7 à 12 mois, les pots de légumes s'ajoutent aux contributions des préparations infantiles et céréales infantiles.

Chez les enfants de 13 à 24 mois, les pots de légumes-viande et les pots de légumes représentent des contributeurs importants, auxquels s'ajoutent progressivement les pommes de terre et autres légumes.

Chez les enfants de 3 à 5 ans, la contribution des aliments courants à l'imprégnation humaine au cadmium augmente nettement, avec un rôle majeur des pommes de terre, puis des

légumes, des produits céréaliers (pâtes/riz/blé raffinés), des soupes et bouillons ainsi que des viennoiseries/pâtisseries/gâteaux/biscuits.

À partir de 6 ans jusqu'à 18 ans et à l'âge adulte : les pains et produits de panification sèche, les pommes de terre, les légumes, les pâtes/riz/blé raffinés et autres produits céréaliers raffinés, ainsi que les viennoiseries/pâtisseries/gâteaux/biscuits sont des contributeurs majeurs, représentant pour plus de la moitié de l'exposition par voie alimentaire à l'imprégnation humaine au cadmium.

Il est noté que la concentration en cadmium a augmenté pour 28 % des aliments, dans l'EAT3 par rapport à l'EAT2, notamment pour les pommes de terre et certains produits céréaliers, en particulier pour les céréales pour petit déjeuner avec une augmentation d'un facteur 3,5 (Anses, 2026).

Les résultats de la présente expertise indiquent que, chez l'enfant à partir de 5 ans comme chez l'adulte, la contribution de la catégorie « chocolat et confiserie » ne dépasse pas 3 % de l'exposition totale de l'alimentation. La Figure 11 l'illustre ; elle présente la part (en %) des groupes de denrées constituant la catégorie « Autres groupes d'aliments » de la Figure 10, chacun expliquant moins de 5 % de l'imprégnation par classe d'âge dans la population, catégorie au sein de laquelle figure le chocolat.

Les experts ont toutefois pris note de l'attention portée par les instances internationales concernant la contamination du cacao par le cadmium (JECFA, 2023). La contribution du cacao en tant qu'ingrédient dans les produits à base de chocolat n'a pas pu être calculée, faute de données scientifiques appropriées. Il conviendrait de mener par la suite des travaux complémentaires sur la contribution totale des produits à base de chocolat à l'exposition.

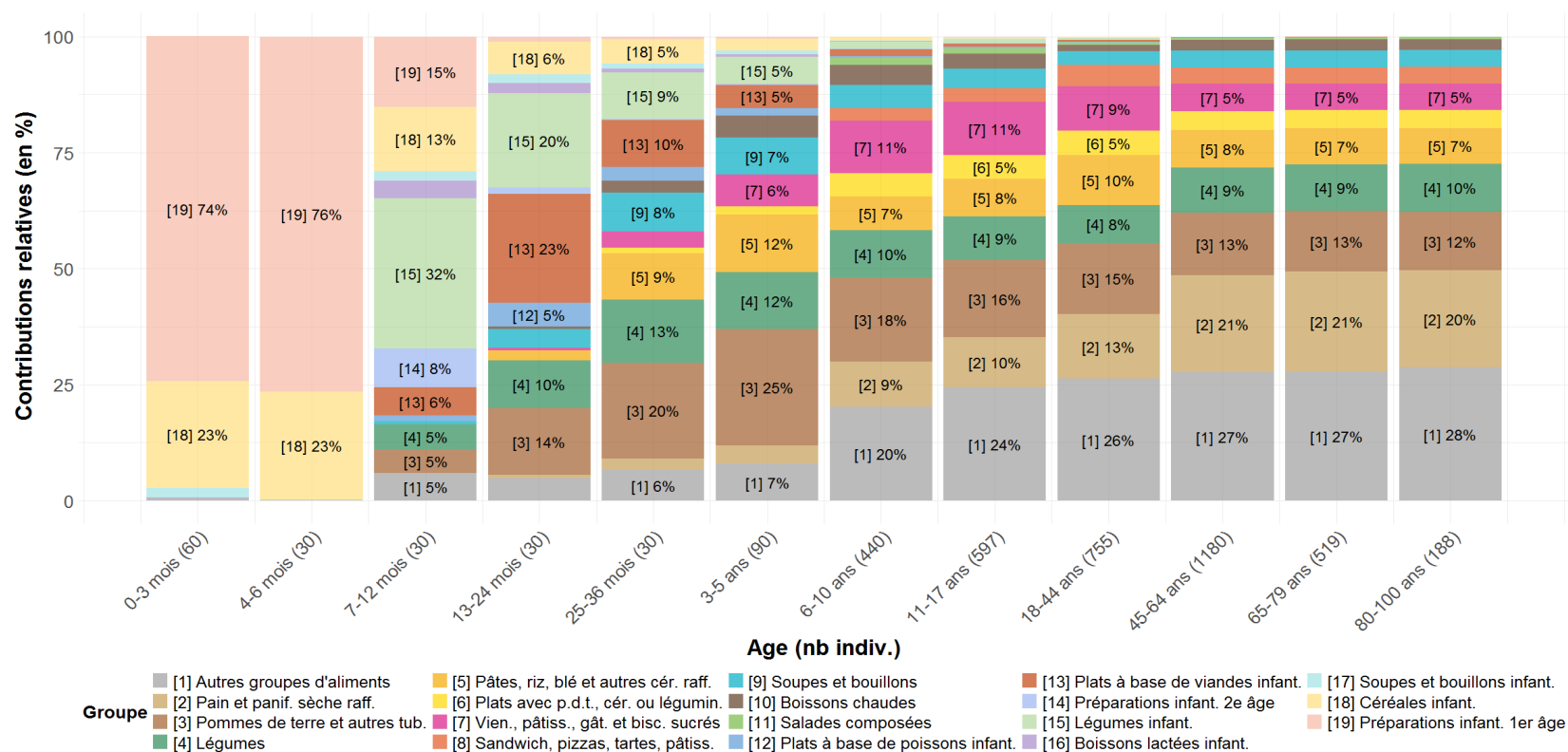


Figure 10. Contribution moyenne (en %) des groupes d'aliments à l'impregnation au cadmium, par classe d'âge pour la population générale française. Les pourcentages dans les barres sont les contributions moyennes relatives des groupes d'aliments. La contribution moyenne est représentée par sa médiane (calculée à partir des 1000 jeux de données). Seules les contributions moyennes supérieures à 5% sont indiquées par leur valeur. A chaque groupe d'aliments est associée une couleur et un nombre. Les groupes d'aliments sont les suivants : [2] 'Pain et panification sèche raffinés', [3] 'Pommes de terre et autres tubercules', [4] 'Légumes', [5] 'Pâtes, riz, blé et autres céréales raffinées', [6] 'Plats à base de pommes de terre, de céréales ou de légumineuses', [7] 'Viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés', [8] 'Sandwich, pizzas, tartes, pâtisseries', [9] 'Soupes et bouillons', [10] 'Boissons chaudes', [11] 'Salades composées', [12] 'Plats infantiles à base de poissons', [13] 'Plats infantiles à base de viandes', [14] 'Préparations infantiles 2ème âge', [15] 'Légumes infantiles', [16] 'Boissons lactées infantiles', [17] 'Soupes et bouillons infantiles', [18] 'Céréales infantiles', [19] 'Préparations infantiles 1er âge' et [1] 'Autres groupes d'aliments'. 'Autres groupes d'aliments' contient tous les groupes d'aliments exclus de la liste précédente et contribuant pour chacun à moins de 5% à l'impregnation comme illustré en Figure 11.

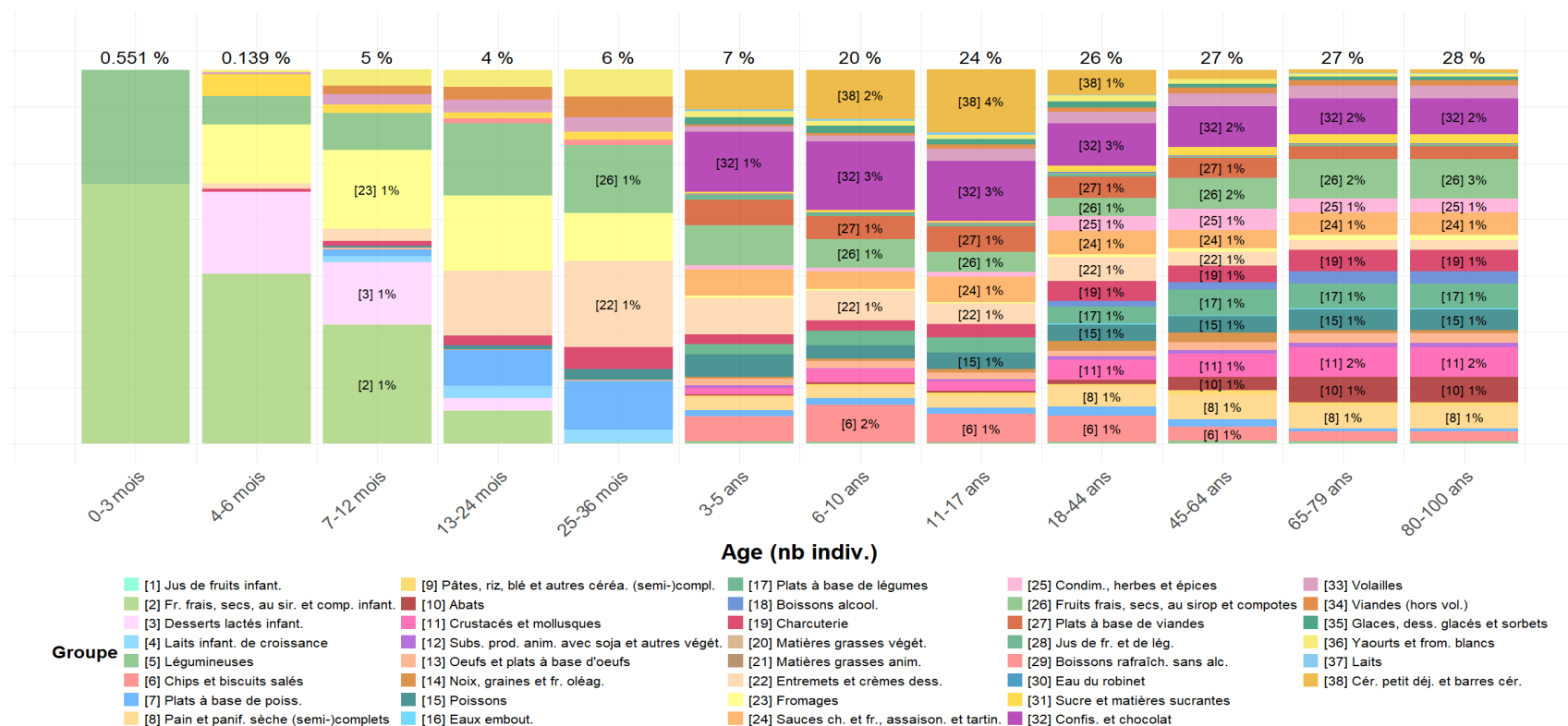


Figure 11. Contribution moyenne (en %) à l'exposition externe (approximation de cadmiurie) au cadmium des groupes d'aliments inclus dans la catégorie 'Autres groupes d'aliments', par classe d'âge et pour la population générale française. Les pourcentages dans les barres sont les contributions moyennes des groupes d'aliments inclus dans la catégorie 'Autres groupes d'aliments' de la Figure 10. La valeur de la contribution totale de ces groupes d'aliments est rappelée en tête de colonne. Seules les contributions moyennes supérieures ou égales à 1% sont indiquées par leur valeur. A chaque groupe d'aliments est associée une couleur et un nombre. Les groupes d'aliments sont les suivants : [1] 'Jus de fruits infantiles', [2] 'Fruits frais, secs, au sirop et compotes infantiles', [3] 'Desserts lactés infantiles', [4] 'Lait infant. de croissance', [5] 'Légumineuses', [6] 'Chips et biscuits salés', [7] 'Plats à base de poissons', [8] 'Pain et panification sèche complets ou semi-complets', [9] 'Pâtes, riz, blé et autres céréales complètes et semi-complètes', [10] 'Abats', [11] 'Crustacés et mollusques', [12] 'Substituts de produits animaux à base de soja et autres végétaux', [13] 'Œufs et plats à base d'œufs', [14] 'Noix, graines et fruits oléagineux', [15] 'Poissons', [16] 'Eaux embouteillées', [17] 'Plats à base de légumes', [18] 'Boissons alcoolisées', [19] 'Charcuterie', [20] 'Matières grasses végétales', [21] 'Matières grasses animales', [22] 'Entremets et crèmes desserts', [23] 'Fromages', [24] 'Sauces chaudes et froides, assaisonnement et tartinables', [25] 'Condiments, herbes et épices', [26] 'Fruits frais, secs, au sirop et compotes', [27] 'Plats à base de viandes', [28] 'Jus de fruits et de légumes', [29] 'Boissons rafraîchissantes sans alcool (BRSA)', [30] 'Eau du robinet', [31] 'Sucre et matières sucrantes', [32] 'Confiserie et chocolat', [33] 'Volailles', [34] 'Viandes (hors volailles)', [35] 'Glaces, desserts glacés et sorbets', [36] 'Yaourts et fromages blancs', [37] 'Lait', [38] 'Céréales pour petit déjeuner et barres céréalières'.

3.6.3. Cinq cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium

L'alimentation et le tabagisme étant identifiés dans cette expertise comme les principales sources de l'imprégnation humaine, ces deux domaines ont été retenus pour une analyse approfondie des cibles et options d'action d'intérêt à l'aide d'une analyse socio-économique.

Concernant l'exposition au cadmium par l'alimentation, les contributions majeures sont des pommes de terre, des produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes. Ces aliments sont à la fois très consommés et constituent pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base. De fait, la réduction de l'exposition dès le plus jeune âge repose avant tout sur des actions visant à réduire les sources de contamination des aliments identifiés comme contributeurs au cours de la vie, la contamination des denrées étant directement liée à la présence de cadmium dans les sols.

Ainsi il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés, qui seraient spécifiques au cadmium.

L'impact des émissions industrielles, liées aux services, aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage sur l'exposition au cadmium de la population générale est considéré dans la présente expertise au regard de l'exposition à l'air, l'eau et les sols. D'une part, les résultats indiquent qu'il s'agit de sources mineures à l'imprégnation humaine au cadmium (contribution < 2%) lorsque considérées *via* l'exposition par l'air et les poussières par les voies d'inhalation, d'ingestion et de contact cutané, après agrégation de toutes sources et voies d'exposition confondues pour la population générale fumeuse et non-fumeuse, hors milieu professionnel (cf. chapitre 5 du rapport). D'autre part, un flux d'apport en cadmium plus faible dans les sols agricoles par les dépôts atmosphériques (14%) a été constaté dans de précédents travaux comparativement aux intrants agricoles (>80%) (cf. chapitre 4 du rapport, Belon et al. 2012 ; Anses, 2019). Par ailleurs, il est constaté dans la littérature une réduction en France des émissions industrielles de cadmium dans les écosystèmes durant la dernière décennie, avec une diminution des émissions industrielles dans l'air et dans l'eau, respectivement de 48 % et 69 % en 10 ans. L'étude des options d'action spécifiquement dédiées aux émissions industrielles générant une problématique spécifique des sites et sols pollués n'est pas approfondie dans cette expertise (cf. chapitre 6 du rapport). En effet, ces émissions font ou doivent faire l'objet, selon les situations, de mesures spécifiques ciblées.

En revanche, la contamination des sols agricoles, elle-même influencée par l'usage d'intrants, et par les pratiques agricoles, a été retenue comme un domaine d'action possible (cf. chapitre 6 du rapport).

Les actions visant à réduire les apports de cadmium aux sols agricoles permettraient de diminuer la contamination des principaux aliments contributeurs à l'exposition humaine et celle des denrées susceptibles d'être cultivées sur ces sols contaminés.

In fine, à partir de ces trois domaines (intrants et pratiques agricoles, alimentation et tabagisme), cinq cibles d'action, ont été identifiées (Figure 12) :

- la réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire (contamination des aliments) ;
- la réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes ;
- l'évolution des pratiques agricoles ;
- l'amélioration du contrôle et de la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires ;
- la réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique.

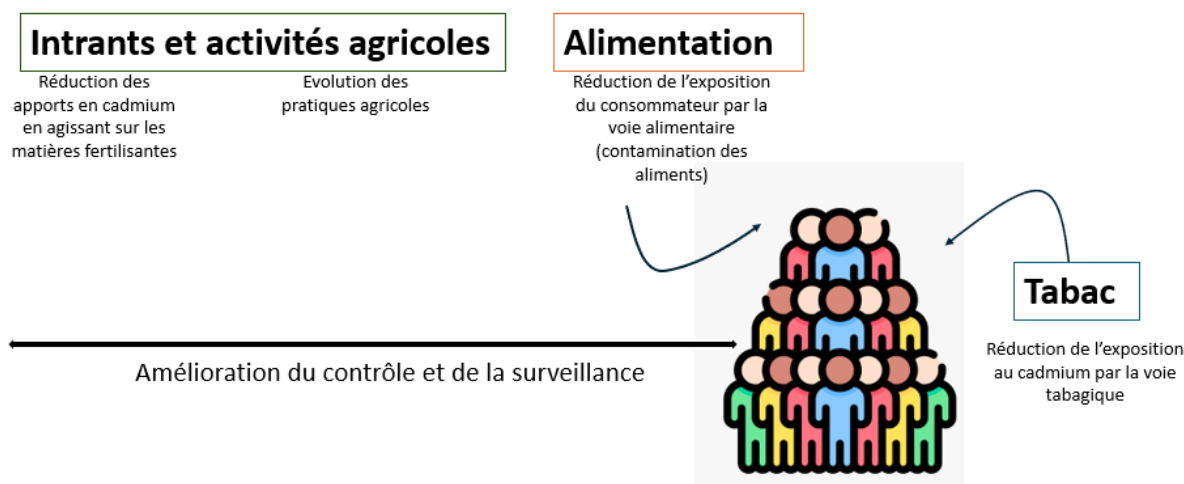


Figure 12. Domaines et cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium de la population française

Pour ces différentes cibles, a été menée une analyse des options d'action sur les sources et voies d'exposition de la population, en tenant compte des enjeux associés à leur mise en œuvre.

Les constats et recommandations qui en découlent sont présentés dans le tableau de synthèse du chapitre 7 du rapport accompagnant le présent avis. Il reprend les conclusions relatives aux cinq cibles d'action analysées.

L'évaluation de l'exposition globale au cadmium de la population générale et l'analyse ciblée de différentes options ont constitué un appui pour retenir et recommander des leviers d'action pour réduire l'imprégnation humaine au cadmium, priorisés dans la section suivante.

3.7. Recommandations de leviers d'action prioritaires pour réduire l'imprégnation humaine au cadmium

Les cinq cibles d'action identifiées comme particulièrement pertinentes ont fait l'objet d'une analyse ayant conduit à la priorisation de leviers d'action. Les experts formulent cinq recommandations d'actions priorisées selon une temporalité court, moyen terme et continue, ainsi que couvrant l'ensemble du continuum, depuis la source jusqu'à l'exposition alimentaire et tabagique :

- action à court-terme : réduire les apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes ;
- action à court-terme : promouvoir une évolution des pratiques agricoles ;

- action à moyen-terme : réduire la contamination en cadmium des aliments ;
- action continue : améliorer le contrôle et la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments ;
- action continue : réduire l'exposition liée au tabagisme.

3.7.1. Action à court-terme : réduire les apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes

La maîtrise des sources de contamination au niveau agricole est un enjeu stratégique pour limiter l'exposition des consommateurs, tout en soutenant une production agricole nationale durable et respectueuse des exigences sanitaires.

Un flux annuel d'apport en cadmium dans les sols agricoles par les matières fertilisantes n'excédant pas $2 \text{ g Cd ha}^{-1}\text{an}^{-1}$, quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole, est le niveau limite recommandé par l'Anses à la suite de ses travaux publiés en 2019. Il permettrait de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et, par conséquent, de diminuer l'exposition alimentaire associée.

Afin de respecter ce flux, l'Anses (2019) recommande :

- une concentration en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source ;
- de tendre vers une concentration égale ou inférieure à 1 mg Cd kg^{-1} de matière sèche (MS) dans les fertilisants d'origine organique.

Au regard du niveau de préoccupation sanitaire pour la population générale française associé au cadmium, l'Anses recommande d'appliquer le plus tôt possible ces valeurs limites en cadmium pour les matières fertilisantes épandues sur les sols agricoles.

Pour atteindre ces valeurs limites, des changements de pratiques sont indispensables d'où l'importance d'identifier à la fois les éventuels verrous (organisationnels, techniques, économiques...) et aussi les leviers mobilisables pour :

- les engrais minéraux phosphatés ;
- les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture ;
- les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR).

Il est important de rappeler que les engrais minéraux phosphatés (la roche broyée étant considérée comme un produit naturel) et les MAFOR sont autorisés en agriculture biologique (AB) : celle-ci est donc potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium.

Pour les engrais minéraux phosphatés, plusieurs voies de mise sur le marché peuvent actuellement être empruntées par les fabricants en France. La conformité au règlement (UE) 2019/1009¹⁶ n'est pas obligatoire et la mise sur le marché d'un produit en conformité avec le droit national ou les règles générales de libre circulation du traité sur le fonctionnement de l'UE reste possible : dans ce cas, en France, une limite en cadmium de $90 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ s'applique, dans l'attente d'un nouveau décret encadrant l'innocuité et l'efficacité des MFSC en France. Pour qu'un produit obtienne le marquage CE, la limite de $60 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 s'applique. Aucune base de données officielles sur

¹⁶ Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE

la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France n'a été identifiée. Il est nécessaire d'abaisser la limite réglementaire en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, de telle sorte qu'elle soit inférieure ou égale à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ et de façon à ne pas excéder un flux annuel d'apport en cadmium dans les sols agricoles de 2 g Cd ha⁻¹an⁻¹ (Anses 2019). Cela est d'intérêt quelle que soit la voie de mise sur le marché et quel que soit le type d'agriculture (conventionnel ou bénéficiant du label AB). Selon les simulations réalisées par Sterckeman et al. (2018a &b) et Carne et al. (2021), maintenir un niveau de concentration en-dessous de ces valeurs permettrait une diminution perceptible de l'accumulation du cadmium dans les sols au cours du temps, et serait indispensable pour abaisser la proportion de la population surexposée au cadmium par la voie alimentaire (Anses, 2019).

Deux voies de réduction de la concentration en cadmium ont été identifiées : d'une part, le recours à des sources d'approvisionnement en roches phosphatées ou produits dérivés présentant de moindres concentrations en cadmium, et d'autre part, la mise en œuvre de procédés de décadmiation lors de la fabrication des engrais minéraux phosphatés permettant une réduction du cadmium à la source (avant sa dispersion dans l'environnement).

Une évolution vers des approvisionnements en roche / engrais minéraux phosphatés à faible concentration en cadmium pourrait contribuer au respect d'une valeur limite abaissée en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France. L'ampleur et la nature des substitutions que cela impliquerait (produits, fournisseurs, pays d'origine) ainsi que les conditions associées sont difficiles à estimer puisqu'il n'existe pas aujourd'hui de système d'acquisition systématique et de partage de ces données par les différents acteurs.

Les procédés de décadmiation apparaissent faisables, avec des techniques existantes, et à un coût raisonnable puisque leur mise en œuvre engendrerait des surcoûts agricoles limités (Sterckeman et al. 2018). En regard, il est plus globalement rappelé que le coût de l'inaction, pour partie estimé en France par une évaluation économique du fardeau de l'ostéoporose attribuable au cadmium, à l'horizon 2040, pourrait aller jusqu'à 2,6 milliards d'euros si l'exposition n'est pas réduite (en considérant la première année suivant la première fracture, chez les femmes de plus de 55 ans) (Ougier et al. 2021). La décadmiation contribuerait à réduire ce fardeau à un coût maîtrisé.

Une analyse du marché permettrait d'identifier les différentes sources d'approvisionnement envisageables et les possibilités de recours à la décadmiation selon les fournisseurs / fabricants, ainsi que les implications techniques, socio-économiques et géopolitiques associées.

Pour les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture, ainsi que les MAFOR, dans un contexte actuel de diminution des apports en phosphore d'origine minérale et de progression des usages d'intrants organiques, la contribution relative des matières organiques aux apports de phosphore aux sols agricoles français a eu tendance à augmenter ces dernières années. Pour ces intrants, est rappelée la précédente recommandation de l'Anses, celle de tendre vers une concentration en cadmium égale ou inférieure à 1 mg kg⁻¹ MS dans les fertilisants d'origine organique, afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ pour l'ensemble des matières fertilisantes (Anses, 2019 ; 2021). Il est noté que cet objectif est indispensable à atteindre dans un contexte de politiques publiques encourageant l'utilisation des MAFOR comme étant issues de ressources renouvelables dans une logique d'économie circulaire. A cet égard, l'absence de réglementation du cadmium dans les effluents d'élevage est identifiée comme une lacune. Il

conviendrait notamment de mener une réflexion sur les modalités d'analyse possibles des effluents d'élevage à l'échelle des exploitations pour contribuer au respect des flux maximaux d'éléments traces métalliques (ETM) dans les sols. Par ailleurs, l'applicabilité de techniques de remédiation des ETM dans les eaux usées pourrait être plus précisément explorée.

3.7.2. Action à court-terme : promouvoir une évolution des pratiques agricoles

En complément de la réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes, il serait nécessaire d'agir sur les pratiques de production agricole, en particulier pour les denrées contribuant le plus à l'exposition au cadmium de la population générale. En effet, parmi ces aliments figurent des denrées agricoles essentiellement ou en partie produites et consommées en France. Les experts ont établi plusieurs constats et formulé des recommandations à cet égard.

D'une part, les experts soulignent que l'exploitation agricole n'est pas soumise à une analyse de sols : certaines informations sur la qualité du sol ne sont donc pas nécessairement connues par les agriculteurs (fonds géochimique naturel ou pollutions anciennes). De plus, le respect de concentrations maximales en cadmium dans le sol n'est exigé que pour l'épandage des boues de STEP, digestats de méthanisation et cendres. En ce sens, les experts recommandent d'étendre l'exigence de caractérisation de la concentration en cadmium dans les parcelles agricoles et de respect de concentrations maximales, à déterminer dans le cadre de futurs travaux, avant l'épandage de toutes matières fertilisantes.

D'autre part, des travaux indiquent la nécessité d'un flux annuel d'apport en cadmium n'excédant pas $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole, afin de maîtriser la contamination des sols, des productions agricoles, et l'exposition alimentaire associée (Anses, 2018 ; 2021). Par conséquent, les experts recommandent de fixer un flux d'apport de cadmium de $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ comme limite à ne pas dépasser.

Pour appuyer la mise en œuvre de ces recommandations, plusieurs moyens sont identifiés :

- Promouvoir, de manière plus systématique qu'actuellement, des pratiques de fertilisation au plus près des besoins au regard de la problématique du cadmium, notamment par des taux d'application et des choix de fertilisant tenant compte des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées, au moyen d'outils adaptés. La mise en œuvre d'une agriculture de précision (par exemple : épandage à taux variable en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques) permettrait ainsi de limiter la contamination des sols. Cela permettrait par ailleurs de réduire la dépendance aux engrais minéraux phosphatés, une ressource non-renouvelable, tout en préservant la fertilité acquise du sol (Demay et al. 2022).
- Promouvoir des pratiques permettant de remobiliser le phosphore du sol, stocké sous des formes chimiques peu disponibles pour les cultures, constitue une voie complémentaire visant à limiter l'usage d'engrais minéraux phosphatés. Des pratiques agro-environnementales sont développées à cet effet (co-cultures, cultures intermédiaires, inoculation de micro-organismes solubilisant le phosphore inorganique). En ce sens, limiter les pertes en phosphore résultant de l'infiltration ou du ruissellement de l'eau peut induire une diminution des besoins en fertilisants. Par exemple, l'incorporation de résidus de culture dans les sols ou la mise en place de couverts végétaux sont cités comme des choix techniques possibles (Centre d'études et de prospective, 2016).

- Concernant la culture des aliments contributeurs majoritaires, céréales et pommes de terre, le recours à des variétés moins accumulatrices de cadmium, ou plus performantes pour mobiliser le phosphore des sols, peut être envisagé. Les nombreuses variétés existantes aujourd'hui sont le résultat de processus de sélection basés sur des critères très divers (précocité, usage culinaire, couleur, fermeté...), mais sans rapport avec le potentiel des plantes à accumuler ou non le cadmium et/ou à mobiliser le phosphore.
- Enfin, la révision de l'étiquetage des matières fertilisantes, en mentionnant leur teneur en cadmium, représente un levier d'action possible. Il serait donc pertinent que les modalités d'étiquetage des matières fertilisantes soient réglementées de telle sorte que les utilisateurs puissent facilement identifier les produits à plus faible concentration en cadmium. L'étiquetage devrait également inclure des préconisations d'usage d'un engrais permettant aux utilisateurs de respecter le flux maximal de cadmium dans les sols agricoles, en tenant compte des apports de cadmium par d'autres intrants, et en attirant l'attention sur les risques de dépassement.

Les experts soulignent plusieurs points de vigilance :

- Certains engrais minéraux phosphatés et MAFOR étant utilisés à la fois en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique, il est nécessaire de mener une action globale sur l'évolution des pratiques agricoles et l'amélioration de la qualité des matières fertilisantes.
- Des pratiques immobilisant les polluants à court terme (par exemple : chaulage, apport de matières organiques, etc.) existent. Les experts rappellent qu'elles ne constituent pas une solution durable et pérenne, et ne peuvent se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles.
- Les recherches sont actives pour mettre à disposition des exploitants des variétés moins accumulatrices en cadmium, surtout pour les céréales ; elles méritent d'être soutenues. Toutefois, le recours à ces variants constitue une solution complémentaire moins protectrice que celle visant une limitation des intrants cadmiés en agriculture.

Pour favoriser l'évolution des pratiques, les experts recommandent que de telles évolutions soient accompagnées par des mesures de formation / information / accompagnement des agriculteurs et acteurs du conseil agricole sur la problématique du cadmium, en fonction des besoins. Cela devrait inclure une présentation des aides publiques existantes permettant de faciliter l'évolution des pratiques, notamment pour le développement d'une agriculture durable.

Ces différents enjeux s'inscrivent plus largement dans les évolutions attendues de la profession en matière de gestion de la santé des sols, comme en atteste la proposition de nouvelle Directive européenne sur la surveillance des sols et la résilience des sols¹⁷, qui prévoit en ce sens des modalités de formation et de conseil à l'attention de la profession agricole.

¹⁷ Directive du parlement européen et du conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 29 septembre 2025. Le Parlement européen devrait procéder à son vote final dans les semaines à venir. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils>

3.7.3. Action à moyen-terme : réduire la contamination en cadmium des aliments

Considérant :

- les résultats d'analyse de cadmium dans 27 391 échantillons de diverses denrées alimentaires, obtenus entre 2010 et 2019, recensés dans le rapport de la plateforme de surveillance de la chaîne alimentaire (SCA) (Plateforme SCA, 2023), et leur comparaison avec les teneurs maximales réglementaires selon le règlement (UE) 2023/915¹⁸ qui montre que peu de dépassement ont été observés ;
- les résultats de la présente expertise et de l'EAT3 soulignant des niveaux d'exposition actuels rien que par la voie alimentaire dépassant la dose journalière tolérable et la valeur toxicologique de référence interne, et identifiant des aliments contributeurs majeurs liés aux pommes de terre, produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes ;

la réduction de l'exposition par la voie alimentaire, en agissant sur le niveau de contamination des aliments contributeurs, est un levier majeur. Le niveau d'ambition de cette option d'action, visant à réduire la contamination en cadmium des aliments, dépend de la diminution des apports en cadmium dans les sols par les intrants agricoles.

Cependant, il est constaté que les teneurs maximales (TM) réglementaires actuelles fixées pour le cadmium dans les denrées alimentaires (règlement (UE) 2023/915) ne sont pas suffisamment protectrices pour la santé du consommateur, puisque même lorsqu'elles sont respectées, une proportion de la population française présente une exposition dépassant la valeur toxicologique de référence.

Il est recommandé de réviser à la baisse les teneurs maximales en cadmium dans les aliments fortement contributeurs, de façon que leurs contributions conjointes à l'exposition n'entraînent pas un dépassement de la valeur toxicologique de référence.

3.7.4. Action continue : améliorer le contrôle et la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments

Le contrôle et la surveillance du cadmium doivent être assurés tout au long des chaînes de production, depuis les sources de contamination en amont, notamment l'usage d'engrais minéraux phosphatés et de fertilisants d'origine organique, jusqu'à la denrée telle que consommée. Elles doivent être en cohérence avec les recommandations d'actions prises antérieurement, portant notamment sur une réduction des apports en cadmium par les matières fertilisantes et l'évolution des pratiques agricoles, ainsi qu'une révision à la baisse des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires.

D'une part, concernant les denrées alimentaires, il est rappelé que la stratégie nationale de surveillance du cadmium (et des autres ETM) repose sur le règlement (UE) 2022/932¹⁹, complété par une analyse de risque nationale et locale. La répartition des analyses entre les différentes catégories d'aliments dans les plans de contrôle repose principalement sur la production nationale et la répartition de la population. Bien que le ciblage repose aussi sur une analyse de risque, la répartition des prélèvements ne reflète pas toujours la contribution réelle

¹⁸ Règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires

¹⁹ Règlement d'exécution (UE) 2022/932 de la commission du 9 juin 2022 relatif aux modalités uniformes de réalisation des contrôles officiels en ce qui concerne les contaminants dans les denrées alimentaires, au contenu spécifique supplémentaire des plans de contrôle nationaux pluriannuels et aux modalités spécifiques supplémentaires applicables à leur élaboration

des aliments à l'exposition au cadmium, cette répartition étant conditionnée par les exigences européennes. Il est donc recommandé de renforcer la surveillance sanitaire du cadmium en ciblant les aliments les plus contributeurs à l'exposition, et en tenant compte des sources diffuses de cadmium, en particulier l'usage d'engrais minéraux phosphatés, de fertilisants organiques (composts, fumiers) et de boues de station d'épuration.

D'autre part, des plans de surveillance et de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) conduits en France par la DGCCRF²⁰ ces dernières années indiquent qu'une part non-négligeable des MFSC présente des non-conformités, y compris en matière de composition et d'innocuité des produits. L'information spécifique au cadmium n'a pas été identifiée. Par ailleurs, aucune base officielle de données représentatives sur les concentrations en cadmium dans les matières fertilisantes en France n'a été identifiée (engrais minéraux phosphatés, engrais organiques, organo-minéraux et supports de culture). L'existence d'une compilation centralisée des données agrégées sur le cadmium, issues des plans d'épandage de MAFOR à l'échelle nationale n'a pas non plus été identifiée. Il semble donc utile qu'une réflexion soit engagée afin que ce type de données soient collectées et disponibles, et de pouvoir suivre l'évolution des concentrations en cadmium dans les MFSC utilisées en France.

Au regard de ces recommandations, il est aussi nécessaire d'entreprendre une réflexion sur l'articulation des plans de contrôle des intrants et pratiques agricoles avec les plans ciblant les denrées alimentaires.

Enfin, les experts soulignent l'importance de la prise en considération des ETM, dont le cadmium, dans l'établissement prochain des critères relatifs à la qualité et à la résilience des sols à l'échelle européenne, prévus dans le cadre de proposition de Directive européenne sur le sujet²¹.

3.7.5. Action continue : réduire l'exposition liée au tabagisme

La cinquième cible vise la réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique. D'une part, la nocivité du tabac n'étant plus à démontrer, il convient d'inscrire la prévention de l'exposition au cadmium par la voie tabagique dans la poursuite et le renforcement de la lutte contre le tabagisme actif et passif. Ce levier constitue une action prioritaire de santé publique pour réduire l'exposition au cadmium et, plus largement, pour lutter contre les méfaits du tabac. Pour cela, il convient de dissuader les individus de fumer et/ou de les inciter à réduire et arrêter leur consommation dès que possible, ainsi que de réduire l'exposition à la fumée de tabac (tabagisme passif).

D'autre part, l'opportunité d'instaurer une teneur réglementaire en cadmium dans le tabac ou un niveau d'émission maximal pourrait être étudiée. Toutefois, cette question n'a pas été approfondie dans le cadre de la présente expertise, compte tenu des enjeux techniques, financiers, juridiques et politiques associés à la réglementation de la composition des produits du tabac. Quelle que soit l'issue d'une telle analyse, une vigilance est nécessaire pour prévenir tout usage marketing qui viserait à présenter un tabac contenant moins de cadmium comme « moins dangereux ».

Ainsi, la lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif demeure le levier central de prévention de l'exposition au cadmium par cette voie.

²⁰ <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/les-fertilisants-et-supports-de-culture-un-secteur-sous>

²¹ Directive du parlement européen et du conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 29 septembre 2025. Le Parlement européen devrait procéder à son vote final dans les semaines à venir. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils>

3.8. Perspectives de recherche

La présente expertise a permis d'identifier plusieurs incertitudes d'ordre méthodologique, liées à un manque ou à une limite dans les connaissances disponibles, recensées dans le chapitre 8 du rapport, participant pour certaines à des perspectives de recherche. L'impact de ces incertitudes tend à sous-estimer les imprégnations prédites, dont les résultats corroborent le problème de santé publique lié au cadmium et soutiennent les recommandations d'options d'action prioritaires pour réduire l'imprégnation humaine. Plusieurs perspectives de recherche nécessitent d'être approfondies tant sur le plan de la préoccupation sanitaire et méthodologique que du pilotage des leviers.

Recommandations de recherche sur le plan de la préoccupation sanitaire

En matière d'évolution des pratiques agricoles et de sélection variétale d'espèces végétales moins accumulatrices de cadmium, le développement de variétés absorbant peu le cadmium et/ou performantes dans l'acquisition du phosphore est à explorer.

En matière de réduction des teneurs maximales en cadmium dans les aliments, il est recommandé d'engager une réflexion sur le développement d'une méthodologie spécifique. Cette méthodologie viserait à fixer une teneur maximale tenant compte de la contribution de l'aliment au régime alimentaire. Elle devrait également tenir compte de l'ensemble des autres sources d'exposition au cadmium. Le modèle méthodologique d'agrégation des sources et voies d'exposition, ainsi que de prédiction de la cadmiurie, mis en œuvre dans cette expertise, constitue à ce titre un support essentiel pour ce développement.

En matière de biosurveillance, la poursuite de la réalisation d'études régulières de biosurveillance pour suivre les niveaux d'imprégnation de la population française est encouragée, ainsi que l'évaluation de l'impact des mesures de gestion mises en place pour réduire l'imprégnation. De plus, cette expertise soulève le besoin de mesures d'imprégnation par le cadmium chez les enfants français âgés de moins de 6 ans. L'acquisition de ces données permettrait d'améliorer la compréhension des déterminants de l'exposition dès le plus jeune âge.

En matière de prévention secondaire et prise en charge des individus, il est souligné que les valeurs repères biologiques par classe d'âge ne peuvent pas être utilisées pour interpréter un dosage de cadmiurie à l'échelle individuelle, pour piloter le dépistage ou le suivi médical, pour lequel une approche spécifique doit être mise en œuvre.

Recommandations de recherche sur le plan de la préoccupation méthodologique

Cette expertise a identifié le besoin d'acquisition de données pour optimiser les résultats d'agrégation des sources et voies d'exposition, notamment en matière d'exposition au cadmium par l'inhalation de particules très fines dans l'air, par l'ingestion de poussières d'origine diverse (transports, industries, etc.), par la consommation de tous les produits de la mer, par les produits de consommation (jouets, tatouage, etc.), par les matériaux au contact des denrées alimentaires, par les produits de vapotage, ou encore par le tabagisme passif et ultra passif.

Le modèle toxicocinétique PBK utilisé dans cette expertise tient compte de l'exposition avant la naissance, en considérant les données de concentrations du cadmium dans le sang de cordon ombilical. Néanmoins, un modèle cinétique du cadmium *in utero* mériterait d'être développé afin d'affiner l'estimation de cette exposition prénatale.

Les résultats de l'expertise démontrent l'apport de la modélisation PBK en matière d'évolution de l'imprégnation en cadmium au cours de la vie, et de caractérisation du risque. Le modèle

pourra être utilisé pour définir des modalités de gestion du risque non plus globalement à l'échelle des populations « enfants » et « adultes » (comme c'est le cas dans les modèles classiques), mais spécifiquement par classes d'âges. En outre, des travaux pourraient être menés pour approfondir l'exploitation de ce type de modèle dans un but de prévention de situations à risque, et pour d'autres substances bioaccumulables.

Par ailleurs, il serait nécessaire d'estimer le fardeau sanitaire du cadmium tenant compte de toutes les voies d'exposition afin d'évaluer les conséquences de l'exposition au cadmium sur la santé de la population. Une telle estimation, assortie d'une analyse socio-économique intégrant les maladies et facteurs de risque associés, permettrait de définir et de comparer des interventions visant à améliorer la santé et à réduire les inégalités liées à cette exposition.

Enfin, dans la population générale, il serait nécessaire de mieux connaître son exposition professionnelle de manière à l'agréger aux autres sources et voies d'exposition. Le travail en cours dans le projet P6.2.1b « Aggregate exposure » du programme européen PARC sera utile dans cet objectif.

Recommandations de recherche concernant le pilotage de leviers d'action

Bien qu'initialement poursuivi comme objectif, les simulations de pilotage de leviers en matière d'impact sur les principales sources contributrices à l'imprégnation humaine n'ont pas pu être menées dans les délais impartis. Cependant, celles-ci seraient pertinentes afin d'affiner les recommandations des leviers d'actions ciblés, et le cas échéant réviser les limites en cadmium à la source en appui à la gestion. Les modèles méthodologiques existant dorénavant, la mise en œuvre de telles simulations amènerait à explorer l'impact d'une action sur une source environnementale à l'imprégnation humaine, en reliant le modèle « source-to-dose » (de la source d'apport en cadmium dans le sol jusqu'à l'aliment tel que consommé) développé par l'Anses (2019) et par Carne et al. (2021) au modèle d'agrégation et de prédiction de la cadmiurie développé dans la présente expertise.

Enfin, l'étude de la source alimentaire pourrait être approfondie par un travail supplémentaire de décomposition plus fine des groupes de denrées en ingrédients, afin d'identifier les principaux ingrédients contributeurs à l'exposition au cadmium ainsi que des leviers d'action spécifiques aux filières concernées.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Dans un contexte d'imprégnation croissante de la population française au cadmium, et des coûts associés au fardeau sanitaire des conséquences de cette exposition, l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a considéré que l'identification et la priorisation d'options d'action visant à réduire les expositions au cadmium étaient nécessaires.

L'agence endosse les conclusions et recommandations des experts dont elle retient, en particulier, les éléments ci-après.

Cette expertise a exploré de manière approfondie le lien entre l'imprégnation humaine en cadmium et la majorité des voies et sources d'exposition en intégrant des composantes nouvelles comme la dynamique temporelle des expositions ou les facteurs socio-économiques. La démarche d'agrégation des expositions visait à identifier, parmi les sources de cadmium les principaux contributeurs pour ensuite proposer des leviers prioritaires d'action.

Le tabac est confirmé comme une source importante d'imprégnation en cadmium pour la population fumeuse. S'agissant de l'exposition à la fumée de tabac, l'Anses rappelle les recommandations en santé publique d'éviction de la cigarette et l'objectif du Programme national de lutte contre le tabac (PNLT) de viser une génération sans tabac à l'horizon de 2032.

Les résultats confirment également que l'alimentation est la source majeure de l'imprégnation humaine en cadmium tout au long de la vie pour la population générale. En particulier, les pains et produits de panification sèche, les pommes de terre, les légumes, les pâtes/riz/blé raffinés et autres produits céréaliers raffinés, ainsi que les viennoiseries/pâtisseries/gâteaux/biscuits, dont plusieurs font partie des aliments de base ou d'aliments très consommés par la population, sont identifiées comme des contributeurs majeurs à l'imprégnation en cadmium.

L'expertise a modélisé les expositions actuelles, pour différentes catégories d'âge, en tenant compte d'un historique d'exposition considérant l'accumulation du cadmium dans l'organisme au cours de la vie. Le repère sanitaire étant défini par une imprégnation à ne pas dépasser à l'âge de 60 ans (Anses, 2019), l'agence a déterminé des repères biologiques par tranche d'âge (dénommés Valeurs repères biologiques (VRB)). Hors population fumeuse, les résultats de la modélisation (cf. figure 9) mettent en évidence des dépassements des VRB, qui sont particulièrement significatifs pour une part de la population des différentes tranches d'âge jusqu'à 18 ans, restent marqués pour les tranches 18-44 ans et 45-64 ans (de l'ordre de la moitié de la population).

Aussi, l'Anses souligne qu'en l'absence de mise en place, à court terme, de mesures renforcées de maîtrise des expositions au cadmium de la population générale, des effets néfastes à terme sont probables pour une part croissante de la population ; la nécessité à agir rapidement et avec détermination est motivée par le fait de freiner une dynamique d'augmentation de l'imprégnation – confirmée par l'écart entre Esteban et ENNS ainsi que par la récente analyse des résultats de l'EAT 3. A défaut, la poursuite de cette dynamique serait, selon l'Anses, porteuse de conséquences sanitaires.

L'identification des contributions à l'exposition, plus précise que celle des travaux antérieurs, complétée par une analyse socio-économique, a permis de déterminer puis d'analyser un panel d'options pour agir sur différentes sources d'exposition au cadmium de la population générale. Ont été retenues des cibles et options d'action d'intérêt, ayant fait l'objet d'une analyse de leur impact potentiel en tenant compte de la faisabilité et de leur coût de mise en œuvre.

Après analyse, l'Agence note que les émissions industrielles et celles liées aux services, transports, produits manufacturés et déchets, en forte diminution en France au cours de la dernière décennie du fait de la réglementation existante, représentent un faible apport aux sols, et de fait une faible contribution aux expositions de la population.

La contamination des sols agricoles, elle-même influencée par l'usage d'intrants et par les pratiques agricoles, a été retenue comme un des domaines d'action en vue de réduire la contamination des denrées alimentaires. Les actions visant à réduire les apports de cadmium aux sols agricoles permettraient de diminuer la contamination des principaux aliments contributeurs à l'exposition humaine et celle des denrées susceptibles d'être cultivées sur ces sols contaminés. De ce fait, les experts ont privilégié les options d'action visant les apports de cadmium aux sols liés aux intrants agricoles ; ceci, dans un contexte spécifique à la France, relevé par les experts, au regard d'une utilisation importante des engrais minéraux

phosphatés, et avec des sources d'approvisionnement pouvant présenter des teneurs élevées en cadmium.

L'Agence rappelle la recommandation principale de son avis de 2019, relative à la limitation du flux annuel d'apport en cadmium par les matières fertilisantes, dans les sols agricoles, ne devant pas excéder $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, quelle que soit leur nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) (Anses, 2019). Une teneur en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés garantit de respecter ce flux annuel de $2 \text{ g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Une teneur en cadmium inférieure à 1 mg Cd.kg^{-1} de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique permettrait aussi de respecter ce flux.

Au vu de l'imprégnation en cadmium modélisée aux différents âges au regard des repères biologiques, pour la population générale française, et compte tenu du mécanisme d'accumulation du cadmium dans l'organisme humain, l'Anses recommande d'appliquer dès que possible ces valeurs limites en cadmium pour les matières fertilisantes épandues sur les sols agricoles. Les options d'action associées supposent un engagement de l'ensemble des acteurs, et pas uniquement des agriculteurs, dont les pratiques sont notamment dépendantes des intrants disponibles sur le marché et des mesures d'accompagnement existantes.

Pour les engrais minéraux phosphatés, l'Anses recommande :

- le recours à des sources d'approvisionnement pauvres en cadmium ou, lorsque cela n'est pas possible, la mise en œuvre de procédés de décadmiation ne dénaturant pas leur fonction première ;
- la révision de l'étiquetage des matières fertilisantes, en mentionnant leur teneur en cadmium, notamment par une réglementation permettant aux utilisateurs d'identifier facilement les produits à faible teneur en cadmium.

Concernant les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture, ainsi que les matières fertilisantes d'origine résiduelles (MAFOR), l'Anses rappelle que les engrais minéraux phosphatés (la roche broyée étant considérée comme un produit naturel) et les MAFOR sont autorisés en agriculture biologique (AB) : celle-ci est donc également concernée par le besoin de vigilance à l'égard des teneurs en cadmium.

De plus, l'Agence recommande de mener une réflexion sur les effluents d'élevage en cohérence avec les autres types de matières pouvant être apportées sur les sols agricoles afin de respecter des flux maximaux d'éléments traces métalliques dans les sols.

Enfin, en matière de pratiques agricoles, l'Anses soutient particulièrement la promotion de nouvelles pratiques agricoles : ajustement des intrants (intrant sur le bon sol, la bonne culture et en quantité ajustée), techniques de remobilisation du phosphore dans les sols (afin d'éviter de nouveaux apports) ou le recours à des variétés végétales moins accumulatrices en cadmium. L'agence note que, parmi les intrants, l'épandage des boues est précédé par une mesure de concentration en cadmium dans les parcelles agricoles (Arrêté du 8 janvier 1998). En cohérence avec sa recommandation fondée sur une approche globale de l'apport en cadmium au sol, l'Anses préconise d'étudier le bénéfice d'une connaissance effective de la teneur des sols avant épandage pour adapter cette recommandation générale à la diversité des situations.

La mise en œuvre de ces dispositions aura des effets sur les denrées produites en France, alors même que la population française consomme également des produits importés d'Europe

et au-delà. Pour ces denrées importées, le levier d'action sur l'offre alimentaire réside notamment dans la fixation de teneurs maximales en cadmium dans les aliments²². A cet égard, l'Anses constate l'existence d'une part significative de la population présentant (par modélisation) des imprégnations en cadmium dépassant l'indicateur VRB. Aussi, l'Anses recommande de réviser à la baisse les teneurs maximales en cadmium dans les aliments fortement contributeurs à l'exposition, en particulier pour l'alimentation de base ou les aliments dont l'EAT 3, récemment publiée, a fait ressortir des augmentations significatives des teneurs mesurées. Au-delà, l'agence mentionne que le respect des repères de consommations élaborées par l'Anses dans le cadre du Plan national nutrition et santé est également de nature à contribuer, en partie, à réduire le niveau des expositions²³ notamment grâce à la réduction de la consommation de denrées à base de blé sucrées et salées (telles que les céréales du petit-déjeuner, gâteaux, biscuits) ou le rééquilibrage entre consommations de céréales et de légumineuses.

Enfin, l'Anses recommande de varier les sources d'approvisionnement, pour éviter l'éventuelle exposition répétée au cadmium en raison de la consommation régulière d'une denrée provenant d'une source ou zone d'approvisionnement exclusive. Elle souligne également l'importance d'informer les consommateurs sur les niveaux élevés de contamination de certaines denrées spécifiques susceptibles de conduire à une surexposition au cadmium en cas de consommation élevée ou régulière.

Au-delà du cas du cadmium, l'Anses souligne l'intérêt de l'approche visant à agréger la prise en compte des sources d'exposition associée à une analyse socio-économique qui pourrait être élargie à d'autres contaminants afin d'améliorer les santés humaines, environnementales et animales.

Gilles SALVAT

MOTS-CLÉS

Cadmium, multi-sources et voies d'exposition, exposition agrégée, analyse socio-économique, options d'action

Cadmium, multiple source and routes of exposure, aggregate exposure, socio-economic analysis, policy options

²² De plus, spécifiquement pour les denrées produites en Europe, il existe une réglementation relative à l'harmonisation des teneurs en cadmium dans les fertilisants UE qui est d'ores et déjà applicable.

²³ L'Anses actualise les repères de consommations alimentaires pour la population française | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2026). Avis et rapport relatifs à la priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium selon une approche d'exposition agrégée (saisine 2023-AUTO-0150). Maisons-Alfort : Anses, 42 p.

BIBLIOGRAPHIE

Anses (2011a). Avis de l'Anses et rapport d'expertise relatifs à l'Étude de l'alimentation française 2 (EAT2) – Tome 1 : contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER2006sa0361Ra1.pdf>

Anses (2011b). Avis de l'Anses relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme (saisine n° 2011-SA-0194). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2011sa0194.pdf>

Anses (2012). Avis de l'Anses et rapport d'expertise collective : Valeur toxicologique de référence pour le cadmium et ses composés. Saisine n°2009-SA-0344. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort, 100 p.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/CHIM2009sa0344Ra.pdf>.

Anses. (2016). Avis de l'Anses du 16 septembre 2016 et rapports d'expertise relatifs à l'Etude de l'Alimentation Totale Infantile (EATi). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
<https://www.anses.fr/fr/content/etude-de-l%E2%80%99alimentation-totale-infantile>

Anses. (2019). Avis de l'Anses et rapports d'expertise relatifs à l'exposition au cadmium – révision de valeur toxicologique de référence par ingestion et de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques et proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions végétales et l'exposition alimentaire. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
<https://www.anses.fr/system/files/VSR2015SA0140.pdf>

Anses. (2020). Avis du 21 juillet 2020 de l'Anses relatif à la teneur maximale en cadmium pour les algues destinées à l'alimentation humaine. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort
<https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2017SA0070.pdf>

Anses. (2023). Avis du 02 mars 2023 relatif au rapport « Intégration de l'exposome dans les activités de l'Anses ». Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
<https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2022METH0197Ra.pdf>

Anses. (2026). Avis relatif aux résultats de l'Étude de l'alimentation totale française 3 (EAT3) - Acrylamide, aluminium, argent, cadmium, mercure et plomb. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

- Arnich N., Sirot V., Rivière G., Jean J., Noël L., Guérin T., Leblanc J-C. (2012). Dietary exposure to trace elements and health risk assessment in the 2nd French Total Diet Study, *Food and Chemical Toxicology* 50(7):2432-2449, <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.04.016>
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). Toxicological profile for Cadmium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf>
- Béchaux C, Bodin L, Cléménçon S, Crépet A. PBPK and population modelling to interpret urine cadmium concentrations of the French population. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2014 Sep 15;279(3):364-372. doi: 10.1016/j.taap.2014.06.026. Epub 2014 Jul 3. PMID: 24998972.
- Brignon, J.M., L. Malherbe, et C. Canturias-Villesuzanne. « Cadmium et ses principaux composés ». Ineris, (2017). <https://substances.ineris.fr/sites/default/files/archives/7440-43-9%20--%20Cadmium%20--%20FTE.pdf>.
- Bundesinstitut Für Risikobewertung (BfR). (2020). « Ceramic Crockery: BfR Recommends Lower Release of Lead and Cadmium: BfR Opinion No 043/2020 of 21 September 2020 ». BfR-Stellungnahmen 2020 : no 043. <https://doi.org/10.17590/20201214-110843>
- Carne G., Makowski D., Carrillo S., Guérin T., Jitaru P., Reninger J-C., Rivière G. & Bemrah N. (2022). Probabilistic determination of a maximum acceptable level of contaminant to reduce the risk of overexposure for a novel or emerging food: the case of cadmium in edible seaweed in the French population, *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39:8, 1439-1452, <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2087921>
- Carne G, Leconte S., Sirot V., Breyse N., Badot P-M., Bispo A., Deportes I. Z., Dumat C., Rivière G., Crépet A. (2021). Mass balance approach to assess the impact of cadmium decrease in mineral phosphate fertilizers on health risk: The case-study of French agricultural soils. *Science of The Total Environment* 760:143374, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143374>
- Centre d'Etudes et de Propective (2016) Analyse n°93. Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l'agriculture. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 8p.
- CITEPA (2023). Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023.
- Demay, Joséphine, Bruno Ringeval, Sylvain Pellerin, et Thomas Nesme. (2023). « Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources ». *Nature Geoscience* 16 (1) : 69-74. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01092-0>.
- Engström A, Michaëlsson K, Suwazono Y, Wolk A, Vahter M, Åkesson A., (2011). Long-term cadmium exposure and the association with bone mineral density and fractures in a population-based study among women. *J Bone Miner Res.* 26(3):486-95. <https://doi.org/10.1002/jbmr.224>
- Engström A., Michaëlsson K., Vahter M., Julin B., Wolk A., Åkesson A., (2012). Associations between dietary cadmium exposure and bone mineral density and risk of osteoporosis and fractures among women, *Bones* 50:1372-1378. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2012.03.018>
- European Food Safety Authority, EFSA (2009). Cadmium in food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *The EFSA Journal* 980, 1-139. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.980>

Fréry, N., Saoudi, A., Garnier, R., Zeghnoun, A., Falq, G., & Guldner, L. (2011) 'Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement'(p. 151) Institut de veille sanitaire: Saint-Maurice (Fra). www.invs.sante.fr

Gyamfi O, Aboko J, Ankapong E, Marfo JT, Awuah-Boateng NY, Sarpong K, Dartey E. A systematic review of heavy metals contamination in cosmetics. *Cutan Ocul Toxicol.* (2024) Mar;43(1):5-12. doi: 10.1080/15569527.2023.2268197. Epub 2023 Nov 2. PMID: 37916307.

IARC, International Agency for Research on Cancer. (2012). Cadmium. Vol 100C. 121-145.

Jean J., Sirot V., Vasseur P., Narbonne J-F., Leblanc J-C., Volatier J-L., Rivière G. (2015). Impact of a modification of food regulation on cadmium exposure. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 73: 478e483. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.07.027>

Jean J., Sirot V., Hulin M., Le Calvez E., Zinck J., Noël L., Vasseur P., Nesslany F., Gorecki S., Guérin T., Rivière G. (2018). Dietary exposure to cadmium and health risk assessment in children – Results of the French infant total diet study, *Food and Chemical Toxicology* 115:358-364, <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.03.031>.

JECFA, (2023). « Safety evaluation of certain contaminants in food. Prepared by the ninety-first meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) - WHO additives series 82. Cadmium ». <https://www.who.int/publications/i/item/9789240060760>

Kjellström T and Nordberg GF. (1978). A kinetic model of cadmium metabolism in the human being. *Environ Res* 16 :1-3, 248-269. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(78\)90160-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(78)90160-3)

Lamon L., Paini A., Siccardi M., Doyle J., McNamara C., Galea K.S., Ghosh M., Louro H., Silva M.J., El Yamani N., Dusinska M., Moeller R., Duca R.C., Cubadda F., Viegas S., Martins C., Price P., (2025). Physiologically based toxicokinetic models in aggregate exposure: A review, *Toxicology Letters*, Volume 413, 2025, 111725, ISSN 0378-4274, <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2025.111725>.

Lara-Torres Sara, Figueiredo Dany, Paz Soraya, Gutiérrez Angel J., Rubio Carmen, González-Weller Dailos, Revert Consuelo, Hardisson Arturo. (2021). Determination and risk assessment of toxic metals in lipsticks from Europe and China, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Volume 67, 2021, 126792, ISSN 0946-672X, <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126792>.

Leconte S., Rousselle C., Bodin L., Clinard F., Carne G. (2021). Refinement of health-based guidance values for cadmium in the French population based on modelling. *Toxicology Letters*, 340 :43-51, ISSN 0378-4274, <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.12.021>

Navarro-Tapia, Elisabet, Mariona Serra-Delgado, Lucía Fernández-López, Montserrat Meseguer-Gilabert, María Falcón, Giorgia Sebastiani, Sebastian Sailer, Oscar Garcia-Algar, and Vicente Andreu-Fernández. (2021). "Toxic Elements in Traditional Kohl-Based Eye Cosmetics in Spanish and German Markets" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18, no. 11: 6109. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116109>

Oleko A., Fillol C., Saoudi A., Zeghnoun A., Bidondo ML., Gane J., Balicco A. (2021). Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. Saint-Maurice : Santé publique France, 43 p. <https://www.santepubliquefrance.fr/docs/impregnation-de-la-population-francaise-par-le-cadmium.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016>

Ougier E., Fiore K., Rousselle C., Assunção R., Martins C., Buekers J. 2021. Burden of osteoporosis and costs associated with human biomonitoring cadmium exposure in three

European countries: France, Spain and Belgium. *Int J Hyg Environ Health*. 234:113747. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113747>

Pappas Steve. (2011). Toxic elements in tobacco and in cigarette smoke: inflammation and sensitization. *Metallomics* ;3(11):1181-98. <https://doi.org/10.1039/C1MT00066G>

Plateforme Surveillance de la chaîne alimentaire (2023). Surveillance du Cadmium dans la chaîne alimentaire. <https://www.plateforme-sca.fr/node/111>

Rebeniak M, Wojciechowska-Mazurek M, Mania M, Szynal T, Strzelecka A, Starska K.(2014). Exposure to lead and cadmium released from ceramics and glassware intended to come into contact with food. *Rocz Panstw Zakl Hig*. 2014;65(4):301-9. PMID: 25526575.

Sterckeman T., Gossiaux L., Guimont S., Sirguez C., Lin Z. (2018). Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century. *Science of the Total Environment* 639 :1440–1452 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.225>

Vanacker Marie, Tressou Jessica, Perouel Guillaume, Glorennec Philippe, Crépet Amélie. (2020). Combining data from heterogeneous surveys for aggregate exposure: Application to children exposure to lead in France, *Environmental Research*, Volume 182:109069, , <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109069>

Wallin M, Barregard L, Sallsten G, Lundh T, Karlsson MK, Lorentzon M, Ohlsson C, Mellström D. (2016). Low-level cadmium exposure is associated with decreased bone mineral density and increased risk of incident fractures in elderly men: The MrOS Sweden Study. *J Bone Miner Res*. 31:4, 732-741. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2743>

WHO (2015). Report on the scientific basis of tobacco product regulation. <https://www.who.int/publications/i/item/who-study-group-on-tobacco-product-regulation-report-on-the-scientific-basis-of-tobacco-product-regulation-fifth-report-of-a-who-study-group>

**Priorisation des leviers d'action pour réduire
l'imprégnation de la population française au
cadmium selon une approche d'exposition agrégée**

Saisine n°2023-AUTO-0150

**RAPPORT
d'expertise collective**

**Comité d'Experts Spécialisé « Évaluation des risques physico-chimiques dans
les aliments » (CES ERCA)**

**Groupe de travail « Priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation
de la population française au cadmium selon une approche d'exposition
agrégée » (GT Cadmium)**

Décembre 2025

Citation suggérée

Anses. (2025). Priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium selon une approche d'exposition agrégée (saisine 2023-AUTO-0150). Maisons-Alfort : Anses, 346 p.

Mots clés

Cadmium, multi-sources et voies, analyse socio-économique, options d'action,

Cadmium, exposure, multi-source and routes, socio-economic analysis, options for action

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, intuitu personae, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL « PRIORISATION DES LEVIERS D'ACTION POUR REDUIRE L'IMPREGNATION DE LA POPULATION FRANÇAISE AU CADMIUM SELON UNE APPROCHE D'EXPOSITION AGREGÉE »

Président

M. Pierre-Marie BADOT – Professeur émérite – Université Marie et Louis Pasteur – Compétences : transfert de contaminants et écotoxicologie

Vice-présidente

Mme Camille DUMAT – Professeure - Toulouse INP-Agro – Compétences : transferts de contaminants, sciences pour la société

Membres

Mme Roseline BONNARD – Ingénieure d'études et de recherche – INERIS – Compétences : évaluation des risques sanitaires, modélisation, transfert

Mme Céline BONNET – Directrice de recherche – INRAE – Compétences : économie

Mme CHEKRI Rachida – Responsable du Laboratoire National de Référence (Éléments Traces Métalliques) – Anses, Laboratoire de sécurité des aliments, unité Éléments Traces Métalliques et Nanomatériaux – Compétences : chimie analytique, contaminants inorganiques et réglementation

Mme Anne-Sophie FICHEUX – Maître de conférences – Université de Bretagne Occidentale – Compétences : toxicologie alimentaire, modélisation et exposition probabiliste

M. Jean-François MASFARAUD – Maître de conférences des universités – Université de Lorraine - Compétences : transfert de contaminants et écotoxicologie

Mme Thao PHAM – Maître de conférences des universités – Université de Reims Champagne Ardennes – Compétences : économie

Mme Marie-Louise SCIPPO – Professeur ordinaire à l'Université de Liège (Belgique) – Compétences : contaminants, résidus, risques chimiques, sécurité sanitaire, qualité nutritionnelle

M. Yann SIVRY – Maître de conférences des universités – Institut de Physique du Globe et Université Paris Diderot – Compétences : chimie analytique

RAPPORTEURS

M. Claude ATGIE – Professeur des universités – ENSCBP Bordeaux INP – Compétences : toxicologie

M. Olivier LAPREVOTE - Professeur des universités, praticien hospitalier - Université Paris Cité Hôpital Européen Georges Pompidou – AP-HP – Compétences : contaminants et autres xénobiotiques, toxicologie générale et mécanismes de toxicité

M. Michel LAURENTIE – Directeur de recherche – Anses, Unité « Expérimentation, modélisation et analyse des données » – Compétences : pharmacocinétique, modélisation mathématique

Mme Laura MAXIM – Chargée de recherche - CNRS - Compétences : socio-économie, risques chimiques, incertitude

M. Philippe SAILLARD – Expert alimentarité emballages, Centre Technique De La Conservation Des Produits Agricoles (CTCPA) – Compétences : réglementation, chimie analytique, chimie des transferts aliment/matériaux, évaluation des risques

M. Louis-Georges SOLER – Retraité – Compétences : économie des filières agricoles et agroalimentaires, politiques nutritionnelles

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- **COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ « ÉVALUATION DES RISQUES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES ALIMENTS » (CES ERCA)**

Président

M. Bruno LE BIZEC – Professeur des universités – Oniris, École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique – Compétences : évaluation du risque, polluants organiques persistants

Vice-présidente

Mme Marie-Louise SCIPPO – Professeur ordinaire à l'Université de Liège (Belgique) – Compétences : contaminants, résidus, risques chimiques, sécurité sanitaire, qualité nutritionnelle

Membres

M. Claude ATGIE – Professeur des universités – ENSCBP Bordeaux INP – Compétences : toxicologie

M. Pierre-Marie BADOT – Professeur émérite – Université Marie et Louis Pasteur – Compétences : transfert de contaminants et écotoxicologie

Mme CHEKRI Rachida – Responsable du Laboratoire National de Référence (Éléments Traces Métalliques) – Anses, Laboratoire de sécurité des aliments, unité Éléments Traces Métalliques et Nanomatériaux – Compétences : chimie analytique, contaminants inorganiques et réglementation

Mme Marie-Yasmine DECHRAOUI BOTTEIN – Professeure – Université Côte d'Azur – Compétences : toxicologie environnementale et biotoxines marines

M. Nicolas DELCOURT – Professeur des Universités – Praticien Hospitalier – Faculté de Pharmacie (Université Toulouse 3) et CHU Toulouse (Centre Antipoison et de Toxicovigilance – Compétences : biochimie et toxicologie clinique

Mme Christine DEMEILLIERS – Professeure des universités – Université Grenoble-Alpes – Compétences : toxicologie

Mme Virginie DESVIGNES – Responsable de la Division Qualité des Environnements Intérieurs – Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) - Compétences : analyse statistique, évaluation de l'exposition et évaluation des risques sanitaires

M. Erwan ENGEL – Directeur de recherche – INRAE – Compétences : chimie analytique

M. Gauthier EPPE – Professeur – Université de Liège (Belgique) – Compétences : chimie analytique, contaminants chimiques et composés néoformés

Mme Anne-Sophie FICHEUX – Maître de conférences – Université de Bretagne Occidentale – Compétences : toxicologie alimentaire, modélisation et exposition probabiliste

M. Eric HOUDEAU – Directeur de recherche – INRAE – Compétences : toxicologie alimentaire, physiopathologie digestive et endocrinologie

M. JAEG Jean-Philippe – Maître de conférences – Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse – Compétences : toxicologie, transfert des contaminants et alimentation animale

Mme Emilie LANCE – Maître de conférences des universités – Université Reims Champagne Ardennes – Compétences : écotoxicologie et cyanotoxines

M. LAPREVOTE Olivier – Professeur des universités, praticien hospitalier - Université Paris Cité Hôpital Européen Georges Pompidou – AP-HP – Compétences : contaminants et autres xénobiotiques, toxicologie générale et mécanismes de toxicité

M. Michel LAURENTIE – Directeur de recherche – Anses, Laboratoire de Fougères, Unité « Expérimentation, modélisation et analyse des données » – Compétences : pharmacocinétique, modélisation mathématique

M. Ludovic LE HEGARAT – Chef d'unité adjoint – Anses, Laboratoire de Fougères, Unité « Toxicologie des Contaminants » – Compétences : toxicologie

M. LEBLANC Jean-Charles – Chef d'unité – Anses, Laboratoire de sécurité des aliments, Unité « Pesticides et Biotoxines Marines » – Compétences : évaluation des risques chimiques, évaluation des expositions alimentaires et contaminants environnementaux

M. Nicolas LOISEAU – Directeur de recherche – INRAE – Compétences : toxicologie

M. David MAKOWSKI – INRAE, Directeur de recherche – Compétences : statistiques, modélisation

Mme Francesca MANCINI – INSERM – Chargée de recherche – Compétences : épidémiologie

M. Eric MARCHIONI – Professeur des universités – Université de Strasbourg, Faculté de Pharmacie – Compétences : chimie analytique

M. Jean-François MASFARAUD – Maître de conférences des universités – Université de Lorraine - Compétences : transfert de contaminants et écotoxicologie

Mme Mathilde MUNIER – Chercheur hospitalier – INSERM, CHU d'Angers – Compétences : perturbateurs endocriniens, toxicité des mélanges et relation dose-réponse

Mme Isabelle OSWALD - Directrice de l'UMR 1331 TOXALIM – INRAE – Compétences : toxicologie et mycotoxines

Mme Anne PLATEL – Maître de conférences des universités – Institut Pasteur de Lille – Compétences : toxicologie, toxicologie génétique et toxicologie réglementaire

M. Yann SIVRY – Professeur des universités – Institut de Physique du Globe et Université Paris Diderot – Compétences : chimie analytique

Mme Paule VASSEUR – Professeure émérite – Université de Lorraine, CNRS – Compétences : toxicologie, écotoxicologie

Les travaux, objets du présent rapport, ont également été suivis par le CES suivant :

▪ **COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ « ANALYSE SOCIO-ECONOMIQUE » (CES ASE)**

Présidence

Mme Laura MAXIM – Chargée de recherche (CNRS) – Compétences : socio-économie, risques chimiques, incertitude.

Vice-Présidence

M. Louis-Georges SOLER – Retraité – Compétences : économie des filières agricoles et agroalimentaires, politiques nutritionnelles.

Membres

Mme Bénédicte APOUEY – Chargée de recherche (CNRS - École d'économie de Paris) – Compétences : économie de la santé, inégalités sociales de santé.

M. Luc BAUMSTARK – Maître de conférences (Université Lyon2) – Compétences : économie publique, économie de l'environnement, économie de la santé, calcul économique public.

Mme Aurélie BINOT – Directrice adjointe de la Maison des Sciences de l'Homme SUD et anthropologue de la santé au CIRAD – Compétences : anthropologie, agronomie (depuis le 15/04/2024)

Mme Céline BONNET – Directrice de recherche (Inrae) – Compétences : économie industrielle, analyse des politiques alimentaires.

M. Thierry BRUNELLE – Chargée de recherche (Cirad) – Compétences : modélisation, usages des sols, sécurité alimentaire, biodiversité, changement climatique.

Mme France CAILLAVET – Retraîtée – Compétences : déterminants socio-économiques des décisions alimentaires, inégalités, analyse des politiques alimentaires.

M. Alain CARPENTIER – Directeur de recherche (Inrae) – Compétences : analyse des systèmes de production agricole, politique agro-environnementale, usage d'intrants chimiques.

M. Thomas COUTROT – Retraité – Compétences : statistiques du travail, évaluation économique, organisation du travail.

Mme Cécile DETANG-DESSENDRE – Directeur scientifique adjoint (Inrae) – Compétences : économie des espaces ruraux, marché du travail agricole.

M. Serge GARCIA – Directeur de recherche (Inrae) – Compétences : économie des ressources naturelles, eau, forêt, services écosystémiques, politiques publiques environnementales.

M. Julien GAUTHEY – Chargé de mission Recherche (OFB) – Compétences : sociologie, socio-économie, biodiversité, agroécologie, économie circulaire, micropolluants.

Mme Emmanuelle LAVAINÉ – Enseignant chercheur (Université de Montpellier) – Compétences : économie appliquée en santé-environnement, évaluation des externalités environnementales de santé (jusqu'au 29 novembre 2023).

M. Marc LEANDRI – Maître de Conférences (Université Versailles-Saint Quentin) – Compétences : économie du risque et de l'information, économie de la pollution, services écosystémiques, développement durable.

Mme Christine LE CLAINCHE – Professeure des universités (Université de Lille) – Compétences : santé-travail, inégalités sociales de santé, prévention, équité et redistribution, l'économie comportementale.

M. Youenn LOHEAC – Enseignant-chercheur (CNRS, université Rennes1, Rennes School of Business) – Compétences : économie expérimentale et comportementale, analyse des comportements alimentaires.

M. Selim LOUAFI – Directeur adjoint (UMR AGAP- Cirad) – Compétences : sciences sociales, biodiversité, biotechnologies, développement durable, sécurité alimentaire, décision publique (jusqu'au 12 janvier 2024).

M. Eric PLOTTU – Chercheur – Compétences : théorie de la décision, méthodologie d'évaluation et aide multicritère à la décision, approches participatives, évaluation socio-économique et environnementale de projets.

Mme Elodie ROUVIERE – Maître de Conférences (AgroParisTech) – Compétences : organisation industrielle, économétrie appliquée, filières agroalimentaires (jusqu'au 13 décembre 2024).

Mme Maïder SAINT JEAN – Enseignante-chercheuse (Université de Bordeaux) – Compétences : économie de l'innovation, éco industrielle, l'économie de l'environnement, transition sociotechnique.

M. Denis SALLES – Retraité – Compétences : sociologie de l'environnement et de l'action publique, gestion des ressources en eau

Mme Léa TARDIEU – Chargée de recherche (Inrae) – Compétences : Services écosystémiques, justice environnementale, biodiversité, analyses spatialisées

M. Jean-Christophe VERGNAUD – Directeur adjoint (Centre d'économie de la Sorbonne - École d'Économie de Paris) – Compétences : économie publique appliquée en santé-environnement, théorie de la décision, économie expérimentale, REACH

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Mme Géraldine CARNE – Coordinatrice d'expertise scientifique – Unité Évaluation des risques liés aux aliments - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Yann LE BODO - Coordinateur d'expertise scientifique - Direction Sciences Sociales, Économie et Société (DISSES)

Contribution scientifique (par ordre alphabétique)

Mme Nathalie ARNICH – Adjointe à la cheffe de l'unité - Unité Évaluation des risques liés aux aliments - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Clément BLASSIAU – Chargé de projets scientifiques – Unité Méthodologie et études - Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Rachna BHOONAH - Coordinatrice d'expertise scientifique – Unité Évaluation des risques liés à l'air - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Nicolas BREYSSE – Chef adjoint de l'unité Résidus et sécurité des aliments - Direction de l'Évaluation des Produits Réglementés

Mme Morgane CHAMPION - Chargée de projets scientifiques - Unité Méthodologie et Études - Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Amélie CREPET - Cheffe de projets scientifiques - Unité Méthodologie et Études - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Keyvin DARNEY – Coordinateur d'expertise scientifique - Unité d'Évaluation des Valeurs de Référence et des Risques liés aux Substances Chimiques (UEVRRiSC) - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Mathieu KERGUELEN – Évaluateur scientifique – Unité Résidus et sécurité des aliments, Direction de l'Évaluation des Produits Réglementés

M. Benoît LABARBE - Chef d'unité – Unité évaluation des produits du tabac et produits connexes - Direction de l'Évaluation des Risques

M. Brice LAURENT – Directeur de la Direction Sciences Sociales, Économie et Société (DISSES)

Mme Alexe NALLAN - Stagiaire – Unité Méthodologie et Études - Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Véronique SIROT - Cheffe de projets scientifiques - Unité Méthodologie et Études - Direction de l'Évaluation des Risques

Mme Karine TACK – Cheffe d'unité - Unité Évaluation des risques liés aux aliments - Direction de l'Évaluation des Risques

Secrétariat administratif

Mme Armelle VIGNERON - Direction de l'Évaluation des Risques

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Afaïa (syndicat des entreprises fournissant les matières fertilisantes et intrants innovants des cultures végétales durables)

Mme Stéphanie TIPREZ, Directrice d'afaïa

M. Cédric ABRIAT, Coprésident du collège supports de culture d'afaïa

Mme Laetitia FOURIE, Présidente d'afaïa

M. Quentin PROTSENKO, Secrétaire adjoint d'afaïa, co-président du collège amendements et engrais

Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER)

M. Christophe NGUYEN, directeur de recherche INRAE

M. Grégory VÉRICEL, ingénieur pôle agronomique chez Arvalis

M. Lionel JORDAN-MEILLE, Maître de Conférences en Agronomie spécialisé sur les questions de nutrition des cultures, Président du COMIFER, co-animateur du groupe de travail « Phosphore » au COMIFER

Direction générale de l'alimentation (DGAL)

M. Niels ENSLEN, chargé de mission risques chimiques, Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires, Sous-direction de la sécurité sanitaire des aliments

M. Laurent NOEL, chef de bureau, Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires, Sous-direction de la sécurité sanitaire des aliments

Mme Céline SCHMIDT, référente nationale contaminants environnementaux, Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires, Sous-direction de la sécurité sanitaire des aliments

M. Nicolas THEVENIN, Chargé d'études matières fertilisantes et support de culture (MFSC), Bureau des intrants et du biocontrôle, Sous-direction de la santé et de la protection des végétaux

Fédération professionnelle des entreprises de services pour l'énergie et l'environnement (FEDENE)

Mme Marie DESCAT, Responsable Commission Bioénergies et territoires

M. Pascal DELANNOY, Directeur Biomasse SOVEN ENGIE Solutions, ENGIE Solutions France

M. Karim TABET, Expert Biomasse chez Dalkia

Syndicat des Professionnels du recyclage par valorisation Agronomique (SYPREA)

M. Patrick FAISQUES, Directeur des relations institutionnelles de Veolia Agriculture France, Membre du bureau du SYPREA

Mme Philippine MARONNE, Chargée de mission Valorisation organique de la FNADE, Membre du bureau du SYPREA

M. Pascal TAMPON, Directeur du développement de Suez Organique, Membre du bureau du SYPREA

Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA)

Mme Florence NYS, Déléguée générale

M. Gildas COTTEN, Responsable Agriculture Environnement

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	15
Liste des tableaux	16
Liste des figures.....	18
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....	20
1.1 Contexte	20
1.2 Objet de la saisine	21
1.2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre.....	21
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts	23
2 Le cadmium, un contaminant préoccupant pour la santé publique.....	24
2.1 Devenir dans l'organisme et toxicité du cadmium	24
2.2 Historique des travaux de l'Anses soulignant la surexposition de la population française au cadmium par son alimentation.....	25
2.2.1 Les Études de l'Alimentation Totale (EAT).....	25
2.2.2 Proposition de valeurs limites dans les engrais minéraux phosphatés et matières fertilisantes pour mieux protéger les consommateurs	27
2.2.3 Recommandation de limiter les expositions des consommateurs en fixant des teneurs protectrices sur le plan sanitaire dans les aliments : précédents travaux de l'Anses sur les algues alimentaires et les bulots.....	28
2.3 Étude Esteban : sur-imprégnation de la population française au cadmium	29
2.4 Évaluation socio-économique du fardeau sanitaire attribuable à l'exposition actuelle, d'origine environnementale et/ou alimentaire au cadmium	30
2.5 Surveillance du cadmium dans l'alimentation : Plateforme de la Surveillance de Chaîne Alimentaire.....	31
2.6 Les enjeux liés à l'exposition au cadmium en France	32
3 Approche méthodologique : vers une approche intégrée pour appréhender la problématique de santé publique du cadmium.....	34
4 Identification des sources et voies d'exposition au cadmium pour la population générale	36
4.1 Approche méthodologique	36
4.2 Origines naturelles et anthropiques du cadmium dans l'environnement.....	36
4.2.1 Les sols : teneurs du fond pédo-géochimique naturel	36
4.2.2 Rejets du cadmium dans l'environnement	39
4.3 Sources anthropiques de cadmium.....	42
4.3.1 Sources en lien avec les activités agricoles	42
4.3.2 Sources industrielles.....	47

4.4	Sources liées aux produits du tabac et produits connexes.....	52
4.4.1	Présence et origine du cadmium dans les produits du tabac et produits de vapotage	52
4.4.2	Exposition au cadmium par les produits du tabac et de vapotage.....	54
4.5	Les produits cosmétiques	56
4.6	Autres sources potentielles.....	57
4.7	Approche intégrée des sources et voies d'exposition humaine au cadmium.....	60
4.7.1	Vue d'ensemble des sources et voies d'exposition humaine au cadmium	60
4.7.2	Schéma conceptuel du GT relatif aux sources et voies d'exposition humaine au cadmium en soutien à l'expertise	61
5	Identification des sources contributrices, situations à risque et déterminants de l'exposition au cadmium dans la population générale française sur la base d'une approche d'exposition agrégée.....	63
5.1	Démarche générale	63
5.2	Approche méthodologique	65
5.2.1	Exposition au cadmium relative à différentes sources par différentes voies.....	65
5.2.2	Analyse des déterminants de l'exposition	84
5.2.3	Agrégation des expositions et prédiction de la cadmiurie.....	85
5.2.4	Identification de la population présentant un risque et contributions des différentes sources et voies à l'imprégnation	89
5.3	Résultats	92
5.3.1	Analyse des déterminants de l'exposition	92
5.3.2	Prédiction de la cadmiurie et identification des sources et voies majoritaires.....	100
5.4	Conclusion sur l'agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie et analyse des déterminants des expositions pour la population générale française	120
6	Identification d'options d'action pour réduire l'imprégnation au cadmium ...	124
6.1	Cadre général et objectifs	124
6.2	Méthodes.....	125
6.2.1	Identification des options d'action	125
6.2.2	Sélection des options d'actions à étudier	126
6.3	Options d'action identifiées	127
6.3.1	Mesures concernant les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et les matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA).....	127
6.3.2	Mesures concernant les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles, la pêche	146
6.3.3	Mesures concernant les activités industrielles, liées aux services, aux transports, les produits manufacturés, les déchets et leur recyclage	166

6.3.4	Mesures concernant les produits du tabac à fumer.....	186
6.3.5	Mesures de prévention secondaire et de prise en charge des individus exposés ..	190
6.4	Conclusion sur l'identification d'options d'action	192
7	Eclairage complémentaire sur des cibles et options d'action d'intérêt.....	194
7.1	Cadre général et objectifs	194
7.2	Méthodes.....	196
7.2.1	Sources de données.....	196
7.2.2	Analyse thématique	198
7.3	Analyse des cibles et options d'action.....	198
7.3.1	Réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire	199
7.3.2	Réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes	204
7.3.3	Évolutions des pratiques agricoles.....	227
7.3.4	Amélioration du contrôle et de la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires	245
7.3.5	Réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique	248
7.4	Synthèse de l'analyse	253
7.4.1	Recommandations-clés	253
7.4.2	Perspectives	255
8	Analyse des incertitudes.....	264
9	Conclusions et recommandations du groupe de travail.....	278
9.1	Conclusions : synthèse de l'expertise	278
9.1.1	Une avancée méthodologique reliant les différentes voies et sources d'exposition avec l'imprégnation humaine	278
9.1.2	Situation de risque sanitaire lié au cadmium : l'alimentation comme source d'exposition principale	280
9.1.3	Cinq cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium	282
9.2	Recommandations de leviers d'action prioritaires pour réduire l'imprégnation humaine au cadmium.....	283
9.2.1	Action à court-terme : réduire les apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes	284
9.2.2	Action à court-terme : promouvoir une évolution des pratiques agricoles.....	286
9.2.3	Action à moyen-terme : réduire la contamination en cadmium des aliments	287
9.2.4	Action continue : améliorer le contrôle et la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments	288
9.2.5	Action continue : réduire l'exposition liée au tabagisme	289
9.3	Perspectives de recherche	290
10	Bibliographie.....	292

10.1	Publications	292
10.2	Normes.....	320
Annexe 1 : Lettre de saisine		322
Annexe 2 : Critères de recherche associées à la revue bibliographique liée à l'identification des sources et voies d'exposition au cadmium		325
Annexe 3 : paramètres cinétiques du modèle toxicocinétique PBK (d'après Gastellu et al 2025).....		333
Annexe 4 : Recherche bibliographique en appui à l'identification d'options d'action.....		335
Annexe 5 : Description succincte de publications scientifiques de synthèse initialement identifiées relatives à des options d'action sur le cadmium		337
Annexe 6 : Options d'action visant les zones, sites et sols pollués.....		341
Annexe 7 : Le cas des jardins potagers.....		344
Annexe 8 : implications de deux scénarios d'adaptation à une action réglementaire sur le cadmium dans les engrais minéraux phosphatés dans l'Union européenne : extraits de résultats de deux évaluations		346

Sigles et abréviations

ADEME	: Agence de la transition écologique (anciennement Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)
ALARA	: <i>As Low As Reasonably Achievable</i> (Aussi bas que raisonnablement possible)
AMM	: Autorisation de Mise sur le Marché
ASE	: Analyse socio-économique
CES	: Comité d'experts spécialisé
CIRC	: Centre International de la Recherche sur le Cancer
CMR	: Cancérigène, Mutagène et Reprotoxique
Comifer	: Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation
CSP	: Code de la santé publique
DGAL	: Direction générale de l'alimentation
DGCCRF	: Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes
DGS	: Direction générale de la santé
DJT	: Dose Journalière Tolérable
EAT	: Étude de l'Alimentation Totale
EATi	: Étude de l'Alimentation Totale infantile
Efsa	: <i>European Food Safety Authority</i> (Autorité européenne de Sécurité des Aliments)
ENNS	: Étude Nationale Nutrition Santé
ERS	: Évaluation des risques sanitaires
Esteban	: Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition
ICPE	: Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
INCA	: Études Individuelles et Nationales de la Consommation Alimentaire
LB	: <i>Lower Bound</i> (hypothèse de censure basse)
MAFOR	: Matières fertilisantes d'origine résiduaire
MFSC	: Matières Fertilisantes et Supports de Culture
OA	: Option d'action
PARC	: <i>Partnership for the Assessment of Risks from Chemicals</i> (Partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques)
PBK	: <i>Physiologically-based toxicokinetic</i> (Modèle toxicocinétique basé sur la physiologie)
SpF	: Santé publique France
STEP	: Boues de station d'épuration
VRB	: Valeur repère biologique
VTR	: Valeur Toxicologique de Référence
UE	: Union européenne

Liste des tableaux

Tableau 1. Limites spécifiques de migration en cadmium pour les céramiques et céramiques émaillées ou décorées destinés au contact alimentaire, fixées par la réglementation (Directive 84/500/CEE, arrêté du 7 novembre 1985, DGCCRF 2016).....	58
Tableau 2. Sources de données mobilisées pour les expositions alimentaires	67
Tableau 3. Données d'entrées, équations, et valeurs utilisées pour estimer l'exposition au cadmium pour la population générale française adulte (≥18 ans) et enfant (0-17 ans) via les sources et voies d'exposition retenues	73
Tableau 4 : Variables socio-démographiques étudiées dans l'analyse des déterminants de l'exposition alimentaire au cadmium	84
Tableau 5. Variables socio-démographiques étudiées dans l'analyse des déterminants de l'imprégnation humaine au cadmium	85
Tableau 6. Valeurs toxicologiques de référence recensées pour le cadmium (source : Anses, https://www.anses.fr/fr/content/liste-des-valeurs-toxicologiques-de-reference-vtr)	89
Tableau 7 : Tableau de régression linéaire des expositions alimentaires des adultes au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives ($p < 0.05$) exprimées en italique	94
Tableau 8 : Tableau de régression linéaire des expositions alimentaires des enfants au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives ($p < 0.05$) exprimées en italique	95
Tableau 9 : Tableau de régression linéaire des imprégnations humaines des adultes au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives exprimées en italique	98
Tableau 10 : Tableau de régression linéaire des imprégnations humaines des enfants au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives exprimées en italique	99
Tableau 11. Moyenne et quantiles de la population générale non-fumeuse française, par classe d'âge, du ratio calculés entre les 1000 valeurs prédites pour chacun des individus et sa cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban.	103
Tableau 12. Moyenne et quantiles de la population générale fumeuse française, par classe d'âge, du ratio calculés entre les 1000 valeurs prédites pour chacun des individus et sa cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban.	103
Tableau 13. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale incluant les fumeurs et les non-fumeurs..	112
Tableau 14. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale des non-fumeurs.....	112
Tableau 15. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale incluant des	

fumeurs. L'absence de dépassement de la VRB implique l'absence de dépassement de la VTR interne de 0,5 µg Cd g ⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans.....	113
Tableau 16. Etapes du référentiel méthodologique d'analyse socio-économique d'options d'action (ASEOA) à l'Anses	124
Tableau 17. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec les denrées alimentaires, EDCH et MCDA	132
Tableau 18. Recommandations d'amélioration de la surveillance du cadmium réparties en 4 domaines, selon le groupe de travail sur le cadmium de la plateforme de la surveillance de la chaîne alimentaire (Plateforme SCA, 2023).....	139
Tableau 19. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec les denrées alimentaires, EDCH et MCDA	141
Tableau 20. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles et la pêche	150
Tableau 21. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles et la pêche.....	160
Tableau 22. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec des activités industrielles, services, transports, produits de consommation, déchets et leur recyclage	171
Tableau 23. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec des activités industrielles, services, transports, produits de consommation, déchets et leur recyclage.....	181
Tableau 24. Acteurs auditionnés et principales thématiques abordées.....	197
Tableau 25. Nature et provenance des importations françaises de roches phosphatées, produits intermédiaires et engrais minéraux phosphatés en France en 2023-24.....	213
Tableau 26. Coûts en investissement et fonctionnement pour 4 familles de procédés de décadmiation de l'acide phosphorique, pour une unité de production d'une capacité de 500 tonnes P ₂ O ₅ /jour (d'après Davister, 1994).....	218
Tableau 27. Analyse et perspectives relatifs à la décadmiation des engrais minéraux phosphatés selon différentes dimensions technique, économique et stratégique.....	220
Tableau 28. Principales voies de traitement applicables aux MAFOR prédominantes	222
Tableau 29. Données sur la valorisation des pommes de terre produites et consommées en France	230
Tableau 30. Données sur la valorisation des céréales produites et consommées en France	231
Tableau 31. Synthèse de l'analyse des cibles et options d'action.....	257
Tableau 32. Tableau des incertitudes identifiées tout au long de l'expertise	265

Liste des figures

Figure 1. Exposition humaine au cadmium - Depuis ses sources dans l'environnement, incluant les matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur (source : Anses, 2019a)	28
Figure 2. Représentation schématique du périmètre de l'expertise conduite dans le cadre de l'auto-saisine de l'Anses et correspondance des chapitres dans le rapport .	34
Figure 3. Carte des teneurs en cadmium total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France.	38
Figure 4. Distribution du cadmium (extrait à l'eau régale) dans les sols agricoles européens (Birke et al. 2017)	39
Figure 5. Rejets du cadmium en kg par type d'activité industrielle en France dans l'air et l'eau en 2012 et 2022 (Source : <i>European Environment Agency, European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)</i> , 2022)	40
Figure 6. Émissions de cadmium dans l'atmosphère en France par secteur en 2022 (Figure réalisée à partir des données CITEPA.CITEPA (2023). Inventaire national des émissions atmosphériques en France – Rapport SECTEN, édition 2023)	42
Figure 7. Apports annuels de cadmium ($\text{g ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) et contribution relative des différentes sources (%) dans les sols des départements français (Belon et al. 2012) ..	43
Figure 8. Concentrations en cadmium ($\text{mg Cd kg}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$) des roches phosphatées en fonction de leur origine géographique (Kubier et al., 2019)	44
Figure 9. Répartition des émissions de cadmium en France et évolution entre 1990 et 2021 (source : CITEPA, 2023)	50
Figure 10. Secteurs contributeurs aux émissions de cadmium et part des flux cumulés de chaque secteur par rapport aux flux cumulés totaux (source : INERIS 2016)	50
Figure 11. Schéma conceptuel relatif aux sources et voies d'exposition humaine au cadmium retenues pour la suite de l'expertise	62
Figure 12. Schéma conceptuel de l'agrégation des sources et voies d'exposition au cadmium, de la prédiction du cadmium urinaire et de l'évaluation de la contribution des sources à l'imprégnation pour la population générale adulte et enfant.	63
Figure 13. Variables, sources de données et modèles retenus pour estimer et agréger les sources et voies d'exposition liées au cadmium pour la population générale française des adultes (≥ 18 ans) et des enfants (0-17 ans)	66
Figure 14. Représentation graphique du modèle PBK, adapté de Kjellström et Nordberg (1978). Exposition orale : tractus gastro intestinal (G), exposition par inhalation : poumons (E2), exposition cutanée : plasma (B1). * : quantité initiale de cadmium à la naissance dans le plasma (B1) et les globules rouges (B2)	88
Figure 15. Valeurs repères biologiques du cadmium médiane (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) en fonction de l'âge	91
Figure 16. Comparaison par classe d'âge des cadmiuries prédites pour la population générale (adultes et enfants) non fumeuse française avec les cadmiuries mesurées dans l'étude Esteban	101

Figure 17. Comparaison par classe d'âge des cadmiuries prédites pour la population générale (adultes et enfants >10 ans) fumeuse française avec les cadmiuries mesurées dans l'étude Esteban.....	102
Figure 18. Fonction de répartition de la cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban (noir), et de la cadmiurie prédite (rose) avec intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5], par classe d'âge, pour la population générale non fumeuse française.	104
Figure 19. Fonction de répartition de la cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban (noir), et de la cadmiurie prédite (rose) avec intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5], par classe d'âge, pour la population générale fumeuse française.....	105
Figure 20. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale non fumeuse par classe d'âge et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025.	108
Figure 21. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale de moins de 12 mois par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025..	109
Figure 22. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale française (adultes et enfants > 10 ans) fumeuse par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025.	110
Figure 23. Contribution moyenne (en %) des groupes d'aliments à l'imprégnation au cadmium, par classe d'âge pour la population générale française.	116
Figure 24. Contribution moyenne (en %) à l'exposition externe (approximation de cadmiurie) au cadmium des groupes d'aliments inclus dans la catégorie 'Autres groupes d'aliments', par classe d'âge et pour la population générale française.	117
Figure 25. Schéma conceptuel de la démarche mise en œuvre	121
Figure 26. Domaines (encadrés) et options d'action (<i>italique</i>) identifiés par le GT pour réduire l'imprégnation au cadmium de la population générale.....	193
Figure 27. Cibles d'action (7.3.1 à 7.3.4) et options d'action associées (→ <i>en italique</i>) le long de la chaîne de production des denrées alimentaires.....	195
Figure 28. Cible d'action (7.3.5) associée aux produits du tabac et options d'action associées (→ <i>en italique</i>)	195
Figure 29. Données de surveillance du cadmium dans les denrées alimentaires.....	200
Figure 30. Répartition géographique et typologique des épandages de Mafor organiques en France en 2011 (Houot et al., 2014).....	223
Figure 31. Taux de couverture de la consommation française par la production nationale (matières premières agricoles ou produits de première transformation des principales filières agricoles et agroalimentaires, moyennes 2018-2020)	229
Figure 32. Guide de fertilisation appliqué par la Nouvelle-Zélande : choix d'un taux d'application et d'un type de fertilisant selon la contamination des sols en Cd (source : Sneath, 2020)	241
Figure 33. Domaines et cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium de la population française	283

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique omniprésent dans les sols, l'air, les eaux et les sédiments (Efsa, 2009). Le cadmium est présent dans l'environnement de manière naturelle et sa présence peut être renforcée par des apports liés à différentes activités anthropiques, notamment agricoles et industrielles. Le cadmium présent dans le sol pénètre dans les végétaux principalement par voie racinaire (et parfois par voie foliaire dans le cas de particules atmosphériques fines) et entre ainsi dans le réseau trophique. Les fumeurs sont aussi exposés au cadmium présent dans le tabac.

Le cadmium est identifié comme un contaminant préoccupant pour la santé publique car il est reconnu cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction (CMR) (IARC, 2012 ; règlement européen n° 1272/2008, dit CLP pour classification, étiquetage et emballage des substances et des mélanges¹). Il entraîne aussi chez l'Homme des atteintes rénales et une fragilité osseuse lors d'une exposition prolongée, notamment par voie orale (Anses, 2019a).

Pour l'exposition par voie alimentaire, les Études de l'alimentation totale (EAT) conduites par l'Anses ont évalué une surexposition d'une partie de la population générale française au cadmium. Selon la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2, Anses, 2011a) et l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi, Anses, 2016), une part des adultes et des enfants a une exposition au cadmium dépassant la dose journalière tolérable (DJT) retenue à cette époque, soit : 0,6 % des adultes, 14% des enfants de 3 à 17 ans, et jusqu'à 36% des enfants de moins de 3 ans.

Reflète de l'ensemble des expositions toutes voies confondues (alimentaire, inhalation, ingestion de poussières, ...), Esteban², la dernière étude nationale de biosurveillance, publiée en 2021 par Santé publique France (SpF), indique que les niveaux d'imprégnation³ en cadmium mesurés chez les adultes français apparaissent plus élevés que ceux mesurés lors de la précédente étude de biosurveillance française (Étude Nationale Nutrition Santé (ENNS), 2006-2007). Dans Esteban, 47,6% de la population générale adulte (18-60 ans) présente des niveaux d'imprégnation en cadmium objectivés par un dépassement de la concentration critique⁴ de cadmium urinaire de 0,5 µg g⁻¹ de créatinine (Oleko et al. 2021). Selon SpF cette évolution est cohérente avec les augmentations des expositions alimentaires observées dans les précédentes EAT (EAT1 et EAT2).

Face à ces constats, l'Anses s'est autosaisie pour, d'une part, réaliser une réévaluation globale de l'exposition humaine au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition et,

¹ <https://chem.echa.europa.eu/100.028.320/harmonised/16394?searchText=cadmium>

² Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition

³ Imprégnation : concentration dans l'organisme. La mesure de la cadmiurie (concentration urinaire en cadmium) est considérée comme un marqueur fiable de l'exposition interne au cadmium chez l'Homme.

⁴ Correspond à la Valeur Toxicologique de Référence interne (VTR interne), terminologie utilisée dans la suite de l'expertise.

d'autre part, identifier des leviers d'action⁵ possibles pour réduire le niveau d'imprégnation de la population française. L'examen de la contribution de ces sources et voies d'exposition permet de proposer des options d'action. Les objectifs de cette auto-saisine visent à :

- (i) développer une méthode d'évaluation de l'exposition agrégée à partir de différentes sources et voies d'exposition pour la population générale française ;
- (ii) caractériser et tester la contribution des sources d'exposition sur les niveaux d'imprégnation de la population française au cadmium, en appui à l'identification de mesures ciblées ;
- (iii) étudier, à l'aide d'une analyse socio-économique (ASE), différentes options d'action permettant de réduire l'imprégnation de la population française au cadmium, ainsi que leur priorisation.

Les résultats visent à fournir des éléments d'amélioration de la maîtrise des risques sanitaires associés au cadmium pour la population générale française.

1.2 Objet de la saisine

L'objet de l'auto-saisine visible en **annexe 1** est une évaluation intégrée de l'exposition humaine au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition sur la base d'une approche d'exposition agrégée et d'une analyse socio-économique, visant à identifier et prioriser des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

1.2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre

Cette expertise a été pilotée par l'Unité d'évaluation des risques liés aux aliments (UERALIM) et par la Direction de l'évaluation des risques (DER). L'analyse socio-économique a été coordonnée par la Direction sciences sociales, économie et société (DiSSES), en support à l'identification et la priorisation de leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium. L'Unité méthodologie et études (UME, DER) a apporté une contribution scientifique à l'expertise. L'Unité d'évaluation des risques liés à l'air (UERA, DER), l'Unité d'évaluation des produits du tabac et produits connexes (UEPTC, DER), l'Unité valeurs de référence et risques liés aux substances chimiques (UEVRRISC, DER), et l'Unité résidus et sécurité des aliments (URSA, Direction de l'évaluation des produits réglementés - DEPR) ont été consultées au cours de l'expertise.

1.2.1.1 Constitution d'un groupe de travail et méthode

L'Anses a confié l'instruction de cette expertise au groupe de travail « Priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium, selon une approche d'exposition agrégée » (GT Cadmium), rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques chimiques dans les aliments » (CES ERCA).

Après appel à candidature, un groupe de travail (GT) a été constitué.

⁵ « L'action » est présentée comme une intervention, mesure, dispositif ou instrument, conçus et mis en place pour répondre à une situation considérée comme problématique.

Pour répondre aux objectifs de l'auto-saisine, le GT a expertisé différents axes de travail selon l'ordre suivant :

1. Identifier et évaluer les expositions au cadmium par source et voie d'exposition.
2. Estimer l'exposition agrégée au cadmium de la population française à partir des sources et voies retenues.
3. Évaluer les expositions internes et identifier la contribution des différentes sources de cadmium à la cadmiurie.
4. Identifier et analyser les options de mesures de maîtrise du risque à l'aide d'une analyse socio-économique (ASE).
5. Identifier et prioriser des leviers d'action ciblés, pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.
6. Émettre des recommandations relatives aux leviers d'action à prioriser pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

1.2.1.2 Interaction avec le programme « Partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques » (PARC)

Le cadmium a été identifié parmi les substances à forts enjeux réglementaires et sanitaires dans le « Partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques » (PARC), financé dans le cadre du programme européen « Horizon Europe ».

Les travaux de cette auto-saisine s'intègrent dans la tâche T6.2 de PARC, portant sur le développement d'une approche intégrée pour l'évaluation de l'exposition et du risque du *workpackage* WP6 « Innovation en évaluation réglementaire du risque ». L'expertise de cette autosaisine a bénéficié en retour des approches développées dans le cadre des projets de cette tâche, en particulier les projets P6.2.1a « *Source-to-dose* » et P6.2.1b « *Aggregate exposure* ». Ces projets permettent de développer la stratégie pour la mise en œuvre d'une exposition agrégée au cadmium à partir des différentes sources et voies d'exposition qui considère les populations générale et professionnelle. En retour, ces projets se sont enrichis des travaux et des réflexions du GT. Toutefois, la présente expertise ne concerne que la population générale, le volet « exposition professionnelle » n'est pas pris en compte.

1.2.1.3 Expertise scientifique et collective

Le Comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques physico-chimiques dans les aliments » (ERCA) a été identifié comme le collectif d'experts pilote pour endosser les analyses et conclusions issues de l'expertise de cette auto-saisine.

La saisine et les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement au CES ERCA (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques) entre juillet 2023 et novembre 2025. Les travaux ont également été présentés et validés par les experts du CES « Analyse Socio-Économique » (ASE) en ce qui concerne l'expertise relevant de son périmètre lié à l'analyse des options de mesures de maîtrise du risque.

Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres des CES.

Ces travaux sont ainsi issus de collectifs d'experts aux compétences complémentaires.

Ils ont été adoptés par le CES ERCA réuni le 14 novembre 2025.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Janvier 2024) »

1.2.1.4 Auditions

Plusieurs auditions ont été conduites au cours de l'expertise, venant notamment en appui à l'analyse thématique des options d'action. Les organisations suivantes ont été auditionnées :

- Afaïa, syndicat professionnel représentant les entreprises qui fournissent les matières fertilisantes et intrants innovants des cultures végétales durables (supports de culture, paillages, amendements organiques, engrais organiques et organo-minéraux et biostimulants), le 24 mars 2025 ;
- COMIFER, Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée, le 4 mars 2025 ;
- DGAL, Direction générale de l'alimentation, Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires ainsi que le Bureau des intrants et du biocontrôle, le 6 février 2025 ;
- FEDENE, Fédération professionnelle des entreprises de services pour l'énergie et l'environnement, le 10 avril 2025 ;
- SYPREA, Syndicat des Professionnels du recyclage par valorisation Agronomique, le 10 avril 2025 ;
- UNIFA, Union des Industries de la Fertilisation, le 14 mars 2025.

1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Le cadmium, un contaminant préoccupant pour la santé publique

Cette section du rapport présente les éléments contextuels qui ont justifié la conduite des travaux de cette auto-saisine.

2.1 Devenir dans l'organisme et toxicité du cadmium

Le cadmium (Cd) est reconnu cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction (CMR). Il a été classé dès 1993 par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) dans le groupe 1 « cancérogène pour l'Homme » pour ses effets cancérogènes au niveau du poumon chez les travailleurs exposés (IARC, 1993). Cette classification a été confirmée dans le cadre d'une mise à jour et d'une réévaluation de tous les composés du groupe 1 des monographies du CIRC (IARC, 2012).

Selon le règlement CLP⁶, le cadmium est classé cancérogène (catégorie 1B), mutagène sur les cellules germinales (catégorie 2) et toxique pour la reproduction (catégorie 2).

En termes de toxicocinétique, le cadmium est un toxique cumulatif dont le risque d'apparition d'effets néfastes chez l'humain est lié à la dose cumulée dans le temps (Anses, 2019a). Le cadmium peut être absorbé par ingestion, par inhalation et par contact cutané. Le taux d'absorption pulmonaire est de 100%, tandis que le taux d'absorption gastro-intestinal varie de 5% chez les hommes à plus de 10% chez les femmes. L'absorption cutanée quant à elle reste très faible, à moins de 0,5 %. L'absorption du cadmium présent dans les aliments est dépendante de l'état nutritionnel de la personne et de la teneur de son alimentation en certains éléments comme le fer, le calcium et les protéines. Une fois absorbé, le cadmium peut se lier aux protéines plasmatiques (par exemple l'albumine), aux métallothionéines ou aux érythrocytes. A partir de ce compartiment sanguin, le cadmium est distribué au niveau hépatique, rénal et dans d'autres tissus. La demi-vie d'élimination sanguine du cadmium est de l'ordre de 100 jours, tandis que la demi-vie d'élimination biologique est plus longue, comprise entre 10 et 30 ans en fonction des organes (Nordberg et Nordberg, 2022).

Après exposition orale, les reins et le système osseux sont les principaux organes cibles du cadmium. Au niveau rénal, le cadmium cible les cellules tubulaires proximales, où son accumulation peut provoquer un dysfonctionnement rénal. En effet, après une exposition prolongée et/ou importante, les lésions initialement tubulaires peuvent s'accompagner d'une diminution du débit de filtration glomérulaire susceptible d'évoluer vers une insuffisance rénale (Anses, 2019a). Au niveau osseux, le cadmium a des effets entraînant une déminéralisation osseuse (ostéoporose) en agissant, soit directement sur le métabolisme du collagène (affectant la structure osseuse), soit indirectement en entraînant la perte de calcium par excrétion urinaire (induisant une fragilité osseuse), engendrant ainsi un risque augmenté de

⁶ Règlement CLP (*Classification, Labelling, Packaging*) désigne le règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances chimiques et des mélanges.

fractures. Après ingestion, le cadmium peut également entraîner d'autres effets néfastes tels que des effets reprotoxiques, tératogènes, neuro-développementaux ou encore cardiovasculaires (Anses, 2019a). Il est suspecté de jouer un rôle dans l'incidence de certains cancers (hormono-dépendant, testiculaire, prostatique, rénal, pancréas, etc.) (Anses et al. ; 2019 ; Oleko et al., 2021).

La cadmiurie, c'est-à-dire le niveau de cadmium présent dans l'urine, constitue un marqueur biologique d'exposition interne au cadmium. La cadmiurie est considérée comme une mesure de la charge corporelle et de la quantité accumulée dans les reins : l'estimation de l'imprégnation par la mesure de la concentration en cadmium dans l'urine reflète les effets rénaux aussi bien pour la population générale que pour les travailleurs exposés. **La mesure de la cadmiurie est ainsi considérée comme un indicateur pertinent de l'exposition interne au cadmium chez l'Homme** (Oleko et al., 2021).

2.2 Historique des travaux de l'Anses soulignant la surexposition de la population française au cadmium par son alimentation

Depuis plusieurs années, l'Anses a conduit des travaux qui ont mis en évidence la surexposition d'une partie de la population française au cadmium, notamment par la voie alimentaire. En conséquence, l'Agence a émis plusieurs recommandations en vue de réduire l'exposition de la population à cette substance.

2.2.1 Les Études de l'Alimentation Totale (EAT)

Réalisées à l'échelle nationale, les Études de l'Alimentation Totale (EAT) de l'Anses reposent sur une méthode standardisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS⁷). Elles ont pour objectif premier de surveiller l'exposition de la population générale française aux substances présentes dans les aliments.

Les EAT sont réalisées auprès de la population générale française âgée de plus de 3 ans. L'Anses a contribué à la 1^{ère} EAT réalisée par l'INRA publiée en 2004 (EAT1). Puis l'Anses a conduit les EAT suivantes, la seconde EAT publiée 2011 (EAT2) et une troisième EAT (EAT3) qui est en cours de réalisation. En 2016, l'Anses a ciblé une EAT sur la population des nourrissons et enfants en bas âge (0-3 ans) : l'EAT infantile (EATi).

Le cadmium figure parmi les substances étudiées dans ces EAT. Les analyses ont montré une augmentation de l'exposition alimentaire de la population au cadmium dans la deuxième EAT (Anses, 2011a) comparativement à la première étude EAT (INRA, 2004).

Dans l'EAT2 (Anses, 2011a), le cadmium a été quantifié dans 79 % des échantillons alimentaires. Une surexposition au cadmium a été observée pour la population générale française. En effet, 0,6 % des adultes et 14% des enfants de 3 à 17 ans avaient des niveaux d'exposition au cadmium dépassant la Valeur Toxicologique de référence retenue à cette époque, à savoir la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de $2,5 \mu\text{g Cd (kg pc)}^{-1}\text{sem}^{-1}$. Il a été montré dans l'EATi (Anses, 2016) que les enfants de moins de 3 ans étaient également surexposés au cadmium, du fait de dépassements de la DHT, variant de 15 à 36% selon la

⁷ https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/75330/9789241502702_eng.pdf

classe d'âge. **Le cadmium a été identifié dans les EAT conduites par l'Anses comme un contaminant de l'alimentation présentant une préoccupation sanitaire.**

Les EAT1 et EAT2 ont permis d'identifier les aliments contributeurs à l'exposition alimentaire au cadmium. Les aliments suivants ont été identifiés comme ayant une teneur particulièrement élevée en cadmium : les crustacés et mollusques, les abats, les biscuits sucrés et salés, ainsi que les barres de céréales et le chocolat. Cependant, en raison de leur niveau élevé de consommation par la population française, d'autres catégories d'aliments, montrant des concentrations en cadmium plus faibles, ressortent comme des contributeurs majeurs à l'exposition alimentaire au cadmium pour la population générale de plus de 3 ans et adulte : **il s'agit du pain et des produits de panification, des pommes de terre et produits apparentés, et des légumes⁸.**

Dans l'EATi, les contributeurs majeurs à l'exposition pour les enfants de moins de 3 ans ayant commencé la diversification alimentaire (enfants de plus de 5 mois) sont similaires à ceux identifiés dans la population générale, principalement les pommes de terre et les légumes.

En 2011, à l'issue de la publication de l'EAT2, l'Anses soulignait la nécessité de poursuivre les efforts pour réduire les apports alimentaires de cadmium et identifier l'origine de l'augmentation des expositions à cette substance.

Dans ce cadre, l'Anses a émis un avis relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires (Anses, 2011b). Dans cet avis, il était constaté que les données d'exposition alimentaire de l'EAT2 indiquaient que 1,4% des adultes présentaient des expositions supérieures à 90% de la valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion. Pour ces individus, au vu du niveau d'exposition par l'alimentation, la marge d'exposition restant au regard du niveau de la VTR est faible. Cela signifie aussi que l'exposition à d'autres sources entraînera une surexposition d'autant plus importante (ex : tabac). L'Anses faisait le constat qu'une action sur les aliments identifiés comme contributeurs majeurs pouvait être pertinente pour limiter l'exposition alimentaire, en agissant notamment sur leurs niveaux de contamination. Ainsi, l'Anses recommandait d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, comme les intrants agricoles (engrais contaminés, épandage de boues de station d'épuration, etc.) à l'origine de la contamination des sols cultivés et des aliments issus de ces productions. Cet avis rappelait que les autres voies d'exposition au cadmium devaient également être prises en compte pour diminuer l'exposition de la population, par l'application de mesures de gestion spécifiques.

En 2016, il était rappelé dans l'EATi que les recommandations émises pour réduire l'exposition de la population générale et visant à diminuer les concentrations de cadmium dans les principaux contributeurs étaient également pertinentes dans le cas des enfants de moins de 3 ans.

Dans l'EAT3 (Anses, 2026), le cadmium est détecté dans 89 % des 719 échantillons analysés. Cette étude montre que les dépassements de la VTR continuent d'être observés en 2025 pour une proportion non négligeable de la population française, tant chez les enfants (23 - 27%) que chez les adultes (1,4 – 1,7 %), traduisant des expositions qui méritent attention en termes de sécurité sanitaire.

Ces éléments contextuels témoignent d'une situation préoccupante liée aux expositions actuelles par l'alimentation au cadmium pour la population française.

⁸ Dénomination des catégories d'aliments dans les EAT

2.2.2 Proposition de valeurs limites dans les engrais minéraux phosphatés et matières fertilisantes pour mieux protéger les consommateurs

En 2019, l'Anses a publié les résultats d'une expertise qui a consisté à étudier une action à mener sur les sources de contamination environnementale au cadmium, en se concentrant notamment sur les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC)⁹, reconnues comme l'un des facteurs contribuant à l'augmentation des concentrations de cadmium dans les sols, et par conséquent dans les aliments issus de ces cultures (Anses, 2019a). À la croisée d'enjeux scientifiques liés aux risques sanitaires du cadmium et d'un contexte réglementaire en évolution pour les fertilisants, dans son avis, l'Anses a recommandé des limites en cadmium dans les matières fertilisantes (Anses, 2019a).

Cet avis soulignait le caractère ubiquitaire du cadmium. Il appuyait la nécessité d'une action de réduction de l'exposition sur le long terme à cet élément par la voie alimentaire, notamment en agissant sur le cycle de contamination que l'apport de matières fertilisantes sur les sols agricoles peut entretenir, comme illustré dans la **Figure 1**. Celle-ci présente un schéma conceptuel de l'exposition humaine au cadmium *via* l'alimentation depuis ses sources dans l'environnement, incluant les matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur.

L'importance de la maîtrise des entrées en cadmium dans ce cycle de contamination (quels que soient les types d'apports) était soulignée par l'Anses. La réduction des flux d'apport en cadmium par les matières fertilisantes dans les boucles du cycle représente alors un levier d'action pertinent pour réduire l'exposition humaine.

Ainsi, l'Anses recommandait un flux annuel d'apport en cadmium par les matières fertilisantes n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole. Ce flux est le niveau maximum recommandé, qui permettrait de contenir la contamination des sols agricoles, des productions agricoles qui en sont issues et par conséquent de diminuer l'exposition alimentaire associée. Une teneur en cadmium égale ou inférieure à 20 mg Cd kg P₂O₅⁻¹ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés, était la limite recommandée pour ne pas dépasser ce flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹. Les engrais minéraux phosphatés ont été identifiés dans cette expertise comme une source agricole majeure d'apport en cadmium dans les sols et en conséquence un domaine d'action prioritaire.

⁹ Les « matières fertilisantes » sont des produits destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ou les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent, notamment :

- Les engrais destinés à apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. Il peut s'agir d'éléments fertilisants majeurs ou secondaires ou encore d'oligo-éléments ;
- Les amendements destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols ;
- Les matières dont la fonction, une fois appliquées au sol ou sur la plante, est de stimuler des processus naturels des plantes ou du sol, afin de faciliter ou de réguler l'absorption par celles-ci des éléments nutritifs ou d'améliorer leur résistance aux stress abiotiques.

Les « supports de culture » sont des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux et à leur permettre, par ancrage de leurs organes absorbants, d'être en contact avec les solutions nécessaires à leur croissance.

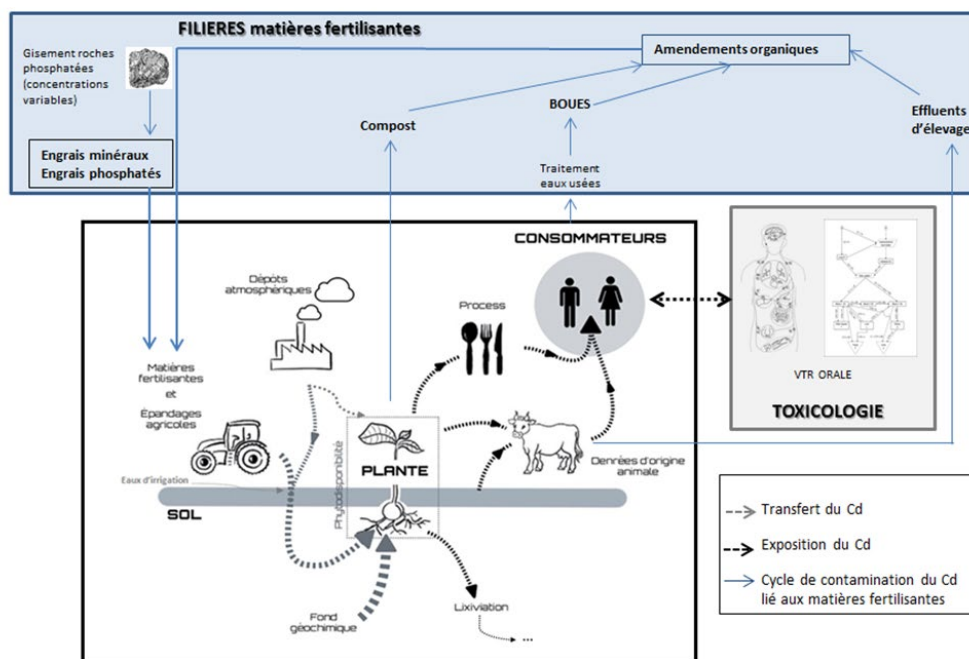


Figure 1. Exposition humaine au cadmium - Depuis ses sources dans l'environnement, incluant les matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur (source : Anses, 2019a)

Par ailleurs, les travaux conduits dans cette expertise ont mis en relief le peu de données disponibles de surveillance biologique ou d'exposition par inhalation au cadmium des travailleurs pour la filière des matières fertilisantes et supports de culture.

En 2021, dans le cadre d'une note d'appui scientifique et technique, l'Anses confirmait ses précédentes recommandations sur les teneurs limites en cadmium préconisées dans les matières fertilisantes visant à enclencher la décroissance du cycle de contamination par le cadmium (Anses, 2021). L'Anses rappelait également la vigilance énoncée dans son avis de 2019 : le fait de recourir à des pratiques pouvant piéger à court terme le cadmium (chaulage, apport de matières organiques, ou encore phytostabilisation) ne constituait pas une solution durable. En effet, ces techniques ne permettent de retenir le cadmium que temporairement et ne garantissent pas que cette adsorption perdure à moyen et long termes sauf interventions humaines répétées. Elles ne peuvent donc pas se substituer à une politique active de réduction à la source des apports de cadmium sur les sols agricoles (Anses, 2019a ; 2021).

2.2.3 Recommandation de limiter les expositions des consommateurs en fixant des teneurs protectrices sur le plan sanitaire dans les aliments : précédents travaux de l'Anses sur les algues alimentaires et les bulots

En 2020, l'Anses émettait des recommandations en lien avec la consommation d'algues alimentaires (Anses, 2020a). Des apports supplémentaires à l'exposition prise en compte dans les EAT, résultant de l'insertion dans le régime alimentaire d'aliments émergents tels que les algues sont susceptibles d'accroître cette exposition. Dans un objectif de limitation des expositions, l'enjeu passe en particulier par la recherche de seuils de concentrations à ne pas dépasser. Dans le cas des algues alimentaires, non prises en compte dans les EAT, l'Anses

a développé une approche pour identifier une teneur maximale en cadmium dans ces produits qui permet de ne pas dépasser la VTR par ingestion du cadmium, en tenant compte de la contribution des algues dans le régime alimentaire des populations concernées, et en considérant l'exposition au cadmium résultant des autres aliments. Pour limiter l'exposition au cadmium par l'alimentation, l'Anses soulignait qu'il appartenait désormais aux autorités compétentes de définir les modalités les plus appropriées pour fixer une teneur maximale, en considérant les algues parmi les autres sources d'apports en cadmium. Ces modalités n'ont pas été définies à ce jour.

Dans le cadre d'une note d'appui scientifique et technique relative à la contamination en cadmium des bulots, l'Anses (2020b) attirait l'attention sur la problématique générale du cadmium dans les denrées alimentaires. L'Agence rappelait qu'elle considérait qu'il était impossible de proposer de nouvelles teneurs maximales pour chaque aliment sans stratégie de gestion des risques prenant en compte l'ensemble des aliments contributeurs et leur importance dans le régime des populations concernées. L'Agence ajoutait qu'une fois cette stratégie arrêtée, des recommandations en teneurs maximales pour l'ensemble des aliments contributeurs pourraient être formulées pour diminuer les expositions et optimiser la maîtrise du risque associé au cadmium dans l'alimentation.

2.3 Étude Esteban : sur-imprégnation de la population française au cadmium

Deux grandes études du programme national de biosurveillance ont été réalisées en France par Santé publique France (SpF). La première Étude Nationale Nutrition Santé (ENNS 2006-2007) a permis de décrire la consommation alimentaire, l'état nutritionnel et l'activité physique de la population générale adulte en France (18-74 ans) et d'étudier les biomarqueurs nutritionnels et environnementaux (Frery et al. 2011). La seconde étude, Esteban, réalisée auprès de la population générale des adultes et des enfants est une étude transversale sur la santé, l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Oleko et al. 2021). Cette étude répond à des objectifs de suivi des expositions aux contaminants chimiques et de surveillance des maladies chroniques ainsi que de surveillance nutritionnelle de la population générale âgée de 6 à 74 ans et résidant en France continentale entre avril 2014 et mars 2016.

L'ENNS a permis d'estimer pour la première fois les niveaux d'imprégnation par le cadmium, qui reflète l'ensemble des sources d'exposition, y compris celles autres que l'alimentation, des adultes vivant en France continentale entre février 2006 et février 2007. Le volet périnatal du programme national de biosurveillance en 2011 avait également permis de connaître les niveaux d'imprégnation par le cadmium des femmes enceintes.

Les résultats de mesures de cadmium dans les urines de la population de l'étude Esteban ont montré des taux de quantification en cadmium de 100 % aussi bien chez les enfants que chez les adultes. Les moyennes géométriques en cadmiurie exprimées en μg de Cd g^{-1} de créatinine étaient de $0,27 \mu\text{g g}^{-1}$ pour les enfants et $0,57 \mu\text{g g}^{-1}$ pour les adultes. La recherche des déterminants de l'imprégnation au cadmium a permis de confirmer des facteurs connus, à savoir : (i) pour les enfants, la consommation des céréales au petit déjeuner et (ii) pour les adultes, la consommation de coquillages et de crustacés, ainsi que (iii) le tabac chez les fumeurs.

De plus, une imprégnation élevée a été observée dans la population de l'étude Esteban par rapport aux autres pays européens et nord-américains, avec des niveaux pouvant être jusqu'à trois à quatre fois supérieurs (Oleko et al. 2021). Les niveaux d'imprégnation par le cadmium en France en 2014-2016 pour la population générale adulte étaient plus élevés et augmentés de 40,6 % par rapport aux niveaux en 2006-2007. Les résultats de l'étude Esteban ont notamment montré que 47,6% de la population générale adulte (18-60 ans) dépassaient le seuil de concentration critique de cadmium urinaire de $0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine, soit **près d'un français sur deux**. Compte tenu de niveaux d'imprégnation plus élevés dans l'étude Esteban comparés à ceux observées dans l'étude ENNS, des effets sanitaires du cadmium sur la santé (cancérogénicité certaine ou suspectée pour l'Homme selon le type de cancer, effets osseux, rénaux, cardiovasculaires et neuro-développementaux) et du caractère bioaccumulable dans l'organisme en lien avec sa demi-vie longue¹⁰, la nécessité de réduire les sources d'exposition, telle que déjà formulée (Anses 2011 ; 2019) est réaffirmée.

2.4 Évaluation socio-économique du fardeau sanitaire attribuable à l'exposition actuelle, d'origine environnementale et/ou alimentaire au cadmium

L'étude de Ougier et al. (2021) réalisée dans le cadre du projet HBM4EU¹¹ fait état d'une évaluation économique d'une partie du fardeau sanitaire que représente l'exposition de la population au cadmium. Les auteurs ont estimé le fardeau de l'ostéoporose attribuable à l'exposition au cadmium chez les femmes des pays de l'UE pour lesquelles des données de cadmiurie étaient disponibles ainsi que les coûts associés. La sélection de ce fardeau repose sur des études épidémiologiques démontrant que les effets osseux sont les effets sur la santé les plus sensibles résultant d'une exposition au cadmium sur le long-terme (Anses, 2019a).

Ougier et al. (2021) ont estimé le nombre de cas d'ostéoporose attribuables à l'exposition au cadmium dans trois pays européens : France, Belgique et Espagne. La population ciblée était constituée de femmes âgées de plus de 55 ans, pour lesquelles des données étaient disponibles sur les niveaux de risque associés à l'exposition au cadmium d'origine alimentaire et/ou environnementale. **Environ 23 % des cas d'ostéoporose ont été attribués à l'exposition au cadmium.** Les auteurs ont calculé les futurs cas d'ostéoporose attribuables au cadmium à l'horizon 2040 si l'exposition au cadmium n'est pas réduite, sur la base des niveaux de cadmium urinaire mesurés chez les femmes âgées de moins de 55 ans. Ils estiment qu'entre 6 et 34 % de cette population féminine sera affectée en 2040. Les coûts du fardeau associé aux fractures liées à l'ostéoporose (poignets, hanches et vertèbres) et imputables au cadmium ont été évalués pour chaque pays ciblés dans cet article. L'évaluation incluait trois types de coûts associés à ces fractures : coûts directs (hospitalisations, soins ambulatoires, médicaments), coûts indirects (perte de travail et de productivité) et coûts intangibles (perte d'années de vie pondérées par la qualité (QALY))¹². Les résultats montrent

¹⁰ La demi-vie d'élimination biologique du cadmium est comprise entre 10 et 30 ans.

¹¹ HBM4EU (Human Biomonitoring for Europe) : il s'agit d'un projet-cadre Horizon 2020 pour le développement d'un réseau de biosurveillance humaine durable à l'échelle européenne (2017-2021), permettant de fournir les meilleures preuves de l'exposition réelle des citoyens aux substances chimiques et de l'impact de ces substances sur l'environnement.

¹² Le QALYs (quality adjusted life years) est un indicateur qui évalue la santé en prenant en compte non seulement la mortalité mais également l'état de santé en termes de qualité de vie ou de niveau d'invalidité. Les QALY expriment des « gains » ou des « espérances de santé ». Une unité QALY

que l'exposition au cadmium joue un rôle majeur dans les coûts sociaux globaux liés à l'ostéoporose. Sur une période correspondant à la première année suivant la première fracture, les coûts absolus varient entre 0,12 (estimation basse en Belgique) et 2,6 milliards d'euros (estimation haute en France) chez les femmes âgées de plus de 55 ans et présentant un risque de fracture imputable à l'exposition au cadmium.

Les résultats de cette étude soutiennent l'importance économique de réduire l'exposition de la population générale au cadmium, particulièrement en France. Les auteurs précisent que cette évaluation du fardeau sanitaire ne tient pas compte des autres effets de l'exposition au cadmium sur la santé, tels que les dysfonctionnements rénaux et les cancers.

Aucune autre publication que celle d'Ougier et al. (2021) sur le fardeau sanitaire n'a été identifiée dans la littérature scientifique revue par les pairs¹³.

2.5 Surveillance du cadmium dans l'alimentation : Plateforme de la Surveillance de Chaîne Alimentaire

En France, la surveillance de la contamination des denrées alimentaires est encadrée par la réglementation et repose sur différents dispositifs publics et privés : d'une part, des plans de surveillance de la contamination des aliments mis sur le marché et des plans de contrôle visant des denrées ciblées présentant un risque supérieur de contamination, mis en place par les pouvoirs publics ; d'autre part, des autocontrôles effectués par les opérateurs privés et le signalement des non-conformités, comme l'exige la réglementation. En outre, des initiatives d'acteurs publics et privés peuvent contribuer à la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, en complément de la réglementation. A la croisée de ces modalités, le cadmium a fait l'objet d'une initiative de la Plateforme de la Surveillance de Chaîne Alimentaire (**SCA**) constituée en 2018. Cette plateforme, « espace collaboratif multidisciplinaire et multi-partenarial dédié à la surveillance sanitaire de la chaîne alimentaire », réunit des acteurs publics (État, agences sanitaires dont l'Anses, instituts de recherche, laboratoires d'analyse) et des acteurs privés (instituts techniques, organisations professionnelles) sur une base volontaire, en vue d'apporter un soutien méthodologique et opérationnel à la surveillance de la chaîne alimentaire¹⁴. Son comité de pilotage est présidé par la DGAL.

En 2020, la plateforme SCA a constitué un groupe de travail sur l'amélioration de la surveillance du cadmium, au vu du caractère ubiquitaire de ce contaminant chimique dans les denrées alimentaires, des préoccupations sanitaires associées à l'exposition des consommateurs au cadmium, et des défis qu'il soulève en termes de surveillance. Durant deux années, les travaux du groupe ont eu pour objectif de décrire et d'évaluer le système français

désigne une année de vie vécue en bonne santé. Une année vécue dans un moindre état de santé est ramenée à une équivalence d'année en bonne santé à partir de l'échelle de pondération QALY. Cette échelle quantifie la qualité de vie associée à la maladie, avec ou en l'absence de traitement : 1 correspond à la bonne santé et 0 à la mort.

¹³ Dans la littérature grise, une étude de la Swedish Chemicals Agency (2013) (<https://www.kemi.se/en/publications/reports/2013/report-4-13-economic-cost-of-fractures-caused-by-dietary-cadmium-exposure>) a également analysé les coûts des fractures imputables à l'exposition alimentaire au cadmium dans la population générale suédoise. Ils étaient estimés à 4,2 milliards SEK (eq. ~376 millions €) /an en incluant les soins de santé à court et long terme, ainsi que les pertes de qualité et d'espérance de vie.

¹⁴ www.plateforme-sca.fr/page/qui-sommes-nous

de surveillance du cadmium, et de proposer des recommandations pour l'améliorer (Plateforme SCA, 2023, synthèse du rapport final du GT).

Ce travail s'est appuyé sur la mutualisation de données issues de 11 dispositifs de surveillance publics et privés, rassemblant près de 75 000 résultats d'analyse de la teneur en cadmium dans diverses matrices relatives à l'alimentation humaine (82%) ou animale (18%), sur la période 2010-2019. Sans prétendre à l'exhaustivité, l'étude des données colligées a montré l'identification des matrices dans lesquelles la teneur moyenne en cadmium est généralement plus élevée, par exemple les abats, mollusques bivalves, graines de tournesol, cacao en poudre. Elle a aussi permis d'identifier des denrées pour lesquelles les concentrations avoisinent (abats d'équins, poissons, mollusques notamment les huîtres), voire dépassent (fines herbes), le plus fréquemment les teneurs réglementaires. Sur la période, les teneurs en cadmium sont décrites comme stables pour l'ensemble des matrices évaluées dont les pommes de terre, exceptée une baisse significative des concentrations en cadmium dans le blé dur. Par ailleurs, les travaux ont conduit à formuler des recommandations en matière d'harmonisation des méthodes d'échantillonnage (définition, suivi, déploiement et application des procédures). Les recommandations ont porté également sur la vérification de l'adéquation et de la performance des méthodes d'analyses pratiquées aux exigences réglementaires, sur l'amélioration de la complétude et du format des données collectées, sur le développement de collaborations entre dispositifs et entre filières (Plateforme SCA, 2023, synthèse du rapport final du GT).

En perspective, le groupe de travail de la plateforme SCA a retenu l'intérêt de procéder à « la ré-évaluation globale des risques liés à l'exposition au cadmium en tenant compte de l'ensemble des sources d'exposition (alimentation, tabagisme, exposition professionnelle) », pouvant permettre de déterminer « la part maximale admissible de cadmium par aliment en tenant compte de l'ensemble des régimes alimentaires, ce qui pourrait conduire à proposer de nouvelles teneurs maximales dans les aliments » (Plateforme SCA, 2023, synthèse du rapport final du GT).

2.6 Les enjeux liés à l'exposition au cadmium en France

Les éléments contextuels présentés ci-avant témoignent d'une situation préoccupante liée aux expositions actuelles au cadmium pour la population.

Face à la situation préoccupante d'une forte imprégnation de la population française par le cadmium, et en préalable à l'identification d'options d'action, une évaluation intégrée de l'exposition humaine prenant en compte différentes sources et voies d'exposition au cadmium apparaît essentielle. C'est dans ce contexte qu'ont été réalisés les travaux du GT visant à répondre à plusieurs enjeux importants :

- (i) un enjeu sanitaire lié à la surexposition, avec à ce jour une imprégnation forte et croissante de la population française ;
- (ii) un enjeu scientifique, lié à une amélioration de l'évaluation des risques *via* un apport méthodologique s'appuyant sur une modélisation de l'exposition agrégée à partir des différentes sources et voies d'exposition au cadmium ;
- (iii) un enjeu socio-économique, lié au fardeau que représente le cadmium et l'importance d'identifier des options d'actions pour remédier au problème sanitaire du cadmium ;

- (iv) un enjeu institutionnel, correspondant au besoin de définir des orientations pour maîtriser le risque associé au cadmium.

La finalité de cette expertise a été donc de réaliser une évaluation intégrée de l'exposition humaine au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition sur la base d'une approche agrégée. Cette expertise visait à explorer la contribution des sources et voies d'exposition à l'imprégnation humaine au cadmium. Elle avait également vocation, par une analyse socio-économique, à identifier et prioriser des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

3 Approche méthodologique : vers une approche intégrée pour appréhender la problématique de santé publique du cadmium

Dans une approche intégrée des risques, il aurait été souhaitable de s'intéresser à l'ensemble des voies, sources et contextes d'exposition (y compris exposition professionnelle spécifique des travailleurs et exposition spécifique des autoproducteurs¹⁵ par exemple). Cependant, compte-tenu de la réalisation de cette expertise dans des délais contraints au regard des objectifs visés, il a été décidé de focaliser les travaux sur la population générale (adultes et enfants) française.

L'approche a consisté à caractériser l'exposition globale au cadmium en agrégeant différentes sources et voies d'exposition. Depuis leurs sources, les apports externes ont été reliés à l'imprégnation (dont l'indicateur choisi est la cadmiurie), en s'appuyant sur une modélisation des expositions au cours de la vie en intégrant la toxicocinétique du cadmium dans le corps humain. L'exposition agrégée au cadmium a été évaluée pour la population générale (infantile 0-3 ans, enfants et adultes) en distinguant fumeurs et non-fumeurs.

A partir de l'approche méthodologique développée dans le cadre de cette expertise, les contributions des différentes sources et voies d'exposition à l'imprégnation humaine ont ainsi été déterminées. Une analyse des options d'action les plus pertinentes pour réduire l'imprégnation de la population au cadmium a été réalisée, à l'aide d'une analyse socio-économique.

La **Figure 2** illustre le périmètre dans lequel a été réalisée cette expertise. Elle regroupe l'ensemble des étapes, associées à chaque chapitre respectif du rapport, menant aux conclusions et recommandations.

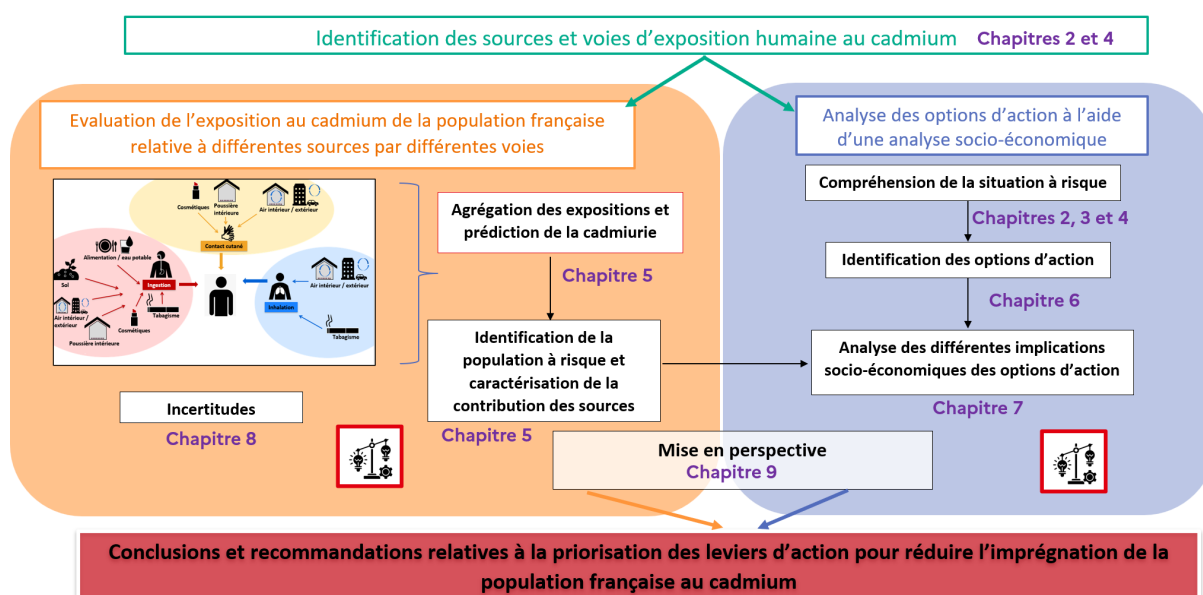


Figure 2. Représentation schématique du périmètre de l'expertise conduite dans le cadre de l'auto-saisine de l'Anses et correspondance des chapitres dans le rapport

¹⁵ Autoproducteurs : personnes produisant des denrées végétales ou animales pour leur propre consommation.

L'expertise a suivi six étapes dont les objectifs respectifs étaient de :

1. Identifier et présélectionner les différentes sources et voies d'exposition au cadmium de la population générale ;
2. Estimer l'exposition agrégée au cadmium de la population générale à partir des sources et voies retenues ;
3. Évaluer la contribution des différentes sources à la cadmiurie ;
4. Identifier les sources et voies majoritairement contributrices à l'exposition interne au cadmium afin d'identifier et de prioriser des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française ;
5. Identifier et analyser les options possibles en matière de mesures de maîtrise du risque à l'aide d'une analyse socio-économique ;
6. Émettre des recommandations relatives aux leviers d'action préalablement identifiés pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

L'expertise menée est détaillée dans les chapitres 4 à 8, avant que les conclusions et recommandations ne soient mises en perspective dans le chapitre 9. L'avis accompagnant le rapport présente la synthèse et les conclusions de l'expertise.

4 Identification des sources et voies d'exposition au cadmium pour la population générale

Ce chapitre recense les sources et voies d'exposition humaine au cadmium en vue d'identifier les plus pertinentes à retenir pour la suite de l'expertise afin de les agréger en évaluation des risques sanitaires. Il apporte aussi une compréhension des situations à risque vis-à-vis du cadmium, en appui à l'analyse socio-économique des options d'action.

4.1 Approche méthodologique

Au regard des enjeux de la saisine, des moyens et des ressources disponibles, une revue de la littérature s'appuyant sur une méthodologie simplifiée a été conduite¹⁶.

Cette recherche bibliographique s'est appuyée sur un ensemble de critères selon chaque source d'exposition du cadmium, une période de recherche de 2010 à 2025, et en privilégiant des données françaises ou par défaut européennes ou internationales. L'**annexe 2** présente en détail les critères identifiés pour la recherche bibliographique en fonction de la source d'exposition.

4.2 Origines naturelles et anthropiques du cadmium dans l'environnement

4.2.1 Les sols : teneurs du fond pédo-géochimique naturel

Les sources naturelles de cadmium sont nombreuses. La concentration médiane en cadmium de la croûte terrestre est estimée à 0,2 mg Cd kg⁻¹ (Kubier et al. 2019). De ce fait, l'altération de nombreuses roches – phosphorites, sulfures métalliques, carbonatites, notamment - libère du cadmium dans les sols, et peut ainsi déjà entraîner un transfert dans l'environnement. D'ailleurs, les mines de phosphates exploitées sont des couches géologiques qui affleurent (fond pédo-géochimique). L'activité volcanique, l'envol de particules fines de sols, les feux de forêts, les embruns marins, ainsi que les dépôts de matière organique morte (humus, litière...) constituent d'autres sources qui peuvent également contribuer à enrichir secondairement les sols en cadmium.

Le fond pédo-géochimique d'un élément tel que le cadmium est défini par sa concentration dans le sol, résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine (Baize, 1997). En règle générale, le fond pédo-géochimique peut être évalué assez facilement pour les sols forestiers qui sont peu remaniés : Baize (2009) estime que pour le cadmium, il est inférieur à 0,12 mg Cd kg⁻¹. L'évaluation est plus difficile

¹⁶ Anses 2023. Guide méthodologique pour la planification des expertises, l'analyse d'incertitude, la revue de la littérature et l'évaluation du poids des preuves. https://www.anses.fr/sites/default/files/Rapport_methologique_ACCMER.pdf

pour les horizons de surface des sols agricoles, qui sont sujets à des apports de cadmium en raison des labours, des retombées atmosphériques d'origine anthropique et des épandages de matières fertilisantes : engrais, effluents d'élevage, boues de stations d'épuration.... Ces apports anthropiques peuvent constituer localement des sources importantes de cadmium. Selon Baize (2009), les horizons labourés des sols agricoles français ont des teneurs comprises entre 0,20 et 0,45 mg Cd kg⁻¹, tandis que dans la base de données du GIS SOL, il est relevé en 2019 des teneurs allant jusqu'à des teneurs maximales de 0,85 mg kg⁻¹ de cadmium. Kubier et al. (2019) indiquent que les concentrations de cadmium dans les sols non contaminés s'échelonnent entre 0,01 et 1 mg kg⁻¹ avec une moyenne mondiale de l'ordre de 0,36 mg kg⁻¹. McLaughlin et al. (2021) rapportent des concentrations naturelles en cadmium dans les sols comprises entre moins de 0,01 mg kg⁻¹ et jusqu'à 100 voire 1000 mg kg⁻¹ lorsque les matériaux parents sont des phosphorites, carbonates ou des schistes argileux. On parle alors d'anomalie géochimique positive.

Il faut aussi noter que l'activité des végétaux peut contribuer à transférer des quantités significatives de cadmium des horizons profonds vers les horizons superficiels : l'absorption racinaire, puis la translocation du métal vers les parties aériennes contribuent à enrichir les horizons de surface lors de la décomposition de la matière organique. Un tel phénomène peut être mis en évidence par l'étude de l'abondance relative des isotopes du cadmium dans les horizons supérieurs qui correspond alors à leur distribution naturelle (Imseng et al. 2018).

Dans ce contexte, des variations des teneurs naturelles en cadmium peuvent exister localement en France, comme illustré dans la **Figure 3**. Les teneurs élevées en cadmium sont le plus souvent associées à l'existence de roches calcaires à faciès bioclastiques, crayeux, récifaux, oolithiques, datant du Jurassique ou du Crétacé. Ces sols naturellement riches en cadmium se rencontrent notamment en Poitou-Charentes, Berry, Bourgogne, Champagne et dans le massif du Jura.

Les teneurs en cadmium total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France

Teneur en cadmium total
en mg.kg^{-1}

- ★ prélèvement impossible
- < seuil de détection
- 0,02 - 0,50
- 0,50 - 1,00
- 1,00 - 2,00
- > 2,00 - (max : 5,53)

Matériaux parentaux

- Pas d'information
- Dépôts alluviaux, marins ou glaciaires
- Roches calcaires
- Matériaux argileux
- Matériaux sableux
- Matériaux limoneux
- Formations détritiques
- Roches cristallines et migmatites
- Roches volcaniques
- Autres roches

Source : Gis Sol, RMQS, 2011 ; Inra, BDGSF, 1998.

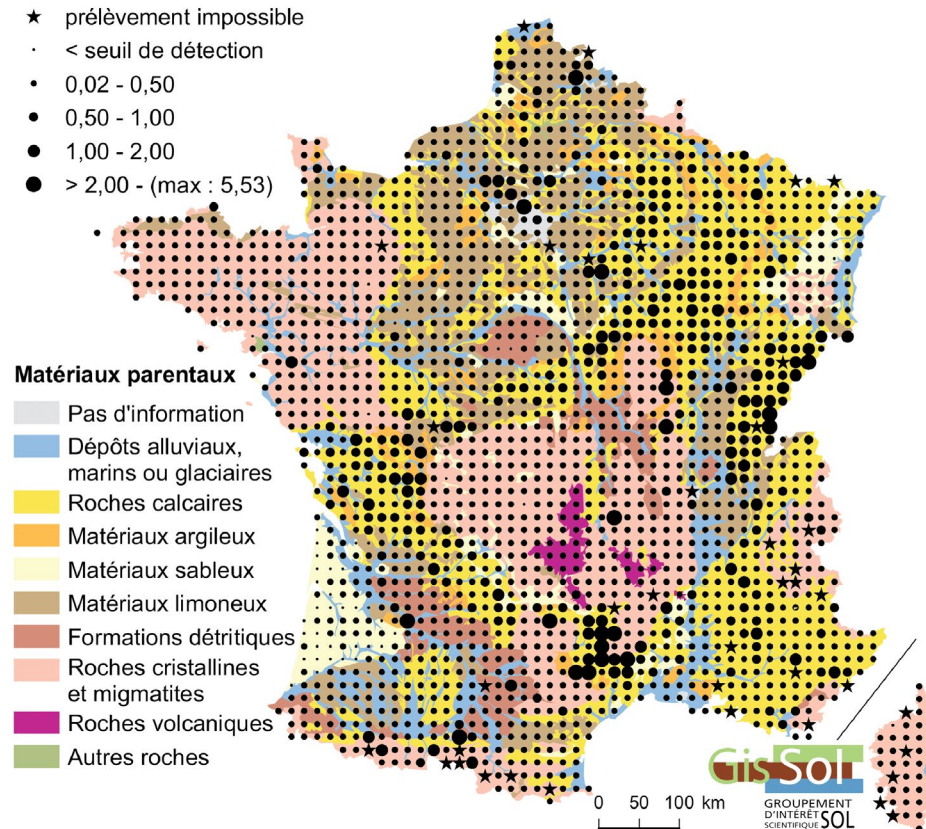


Figure 3. Carte des teneurs en cadmium total des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France. Les teneurs sont exprimées en mg par kg de sols. Source : Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

A l'échelle européenne, le projet GEMAS (*Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil of Europe*) a permis d'analyser plus de 4 000 échantillons de sols agricoles et prairiaux (Birke et al. 2017). Les résultats indiquent qu'à l'échelle européenne, la concentration médiane de cadmium est égale à $0,182 \text{ mg kg}^{-1}$ dans les sols agricoles et à $0,197 \text{ mg kg}^{-1}$ dans les sols prairiaux. La **Figure 4** fournit la carte de la distribution du cadmium (extrait à l'eau régale) dans les sols agricoles européens.

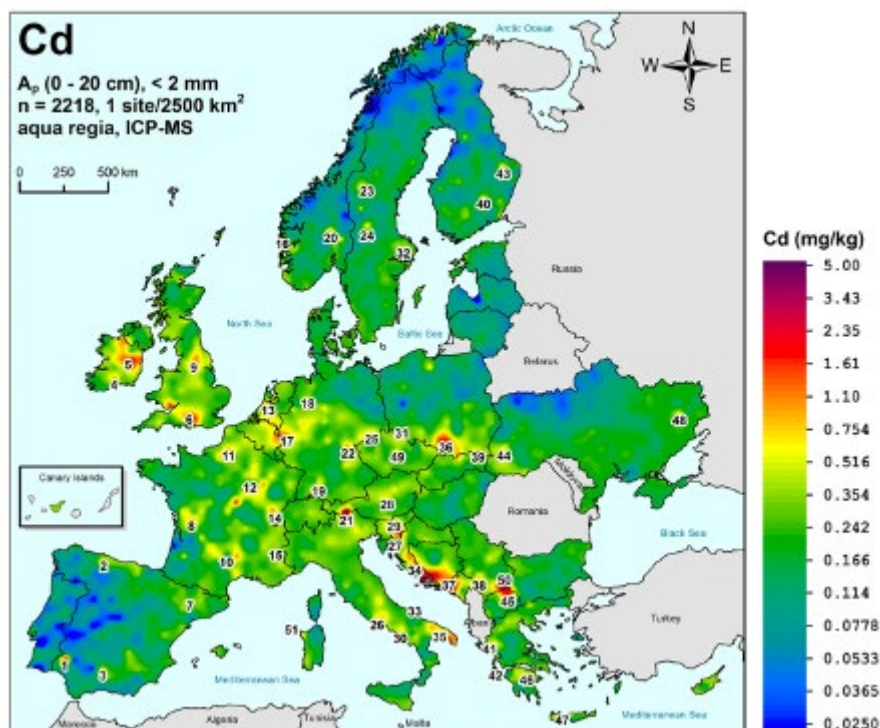


Figure 4. Distribution du cadmium (extrait à l'eau régale) dans les sols agricoles européens (Birke et al. 2017)

Birke et al. (2017) considèrent que la distribution spatiale des teneurs en cadmium dans les sols européens est généralement principalement modulée par le fond pédo-géochimique et par la pédogenèse à l'œuvre depuis la dernière période glaciaire. Mais en même temps, selon ces auteurs, les émissions anthropiques (activités minières, industries métallurgiques, urbanisation, fertilisations...) peuvent rendre compte localement des concentrations élevées qui peuvent être observées.

McLaughlin et al. (2021) estiment que des stocks élevés de cadmium géogénique¹⁷ existent dans de nombreux sols. Ce stock est compris entre 300 et 1500 g ha⁻¹ dans les horizons labourés des sols agricoles, ce qui correspond à une teneur variant entre 0,1 et 0,5 mg kg⁻¹. Ces auteurs font par ailleurs remarquer que la gestion de ces quantités de cadmium peut s'avérer plus problématique que celle des contaminations anthropiques puisque d'une part, il n'est pas possible de réduire ou supprimer ces apports et que d'autre part, les concentrations élevées ne sont pas limitées aux seuls horizons superficiels (McLaughlin et al. 2021).

En conclusion, la présence naturelle de cadmium dans les sols constitue une source susceptible de participer à l'exposition humaine et qu'il est donc nécessaire de prendre en compte dans l'analyse des options d'action.

4.2.2 Rejets du cadmium dans l'environnement

D'après la base de données du Registre européen des rejets et des transferts de polluants (E-PRTR) de l'Agence européenne pour l'environnement, entre 2005 et 2023, les émissions de

¹⁷ Relatif à la géogénie, conception de l'origine du globe terrestre

cadmium dans l'air ont diminué de 43 % dans les 27 États membres de l'UE. Selon cette base de données, en France, ces émissions de cadmium ont notamment diminué de 60,6 % en 2023 par rapport aux niveaux de 2005¹⁸.

Comme illustré par la **Figure 5**, en matière de rejets industriels dans l'environnement, la base de données du Registre européen des rejets et des transferts de polluants (E-PRTR)¹⁹ de l'Agence européenne pour l'environnement a répertorié en 2022, en France, des émissions de cadmium estimées à 0,81 tonne dans l'air, et 0,36 tonne dans l'eau²⁰.

Par rapport aux émissions de l'année 2012 (1,55 tonnes dans l'air et 1,17 tonnes dans l'eau), il est constaté des baisses respectivement de 48 % et 69 % dans l'air et dans l'eau (**Figure 5**). Le **secteur du traitement des métaux puis de l'énergie et de l'extraction minière** seraient les sources principales de rejets atmosphériques, alors que les rejets dans l'eau proviendraient principalement **du traitement des déchets, de l'eau et également de l'industrie chimique**.

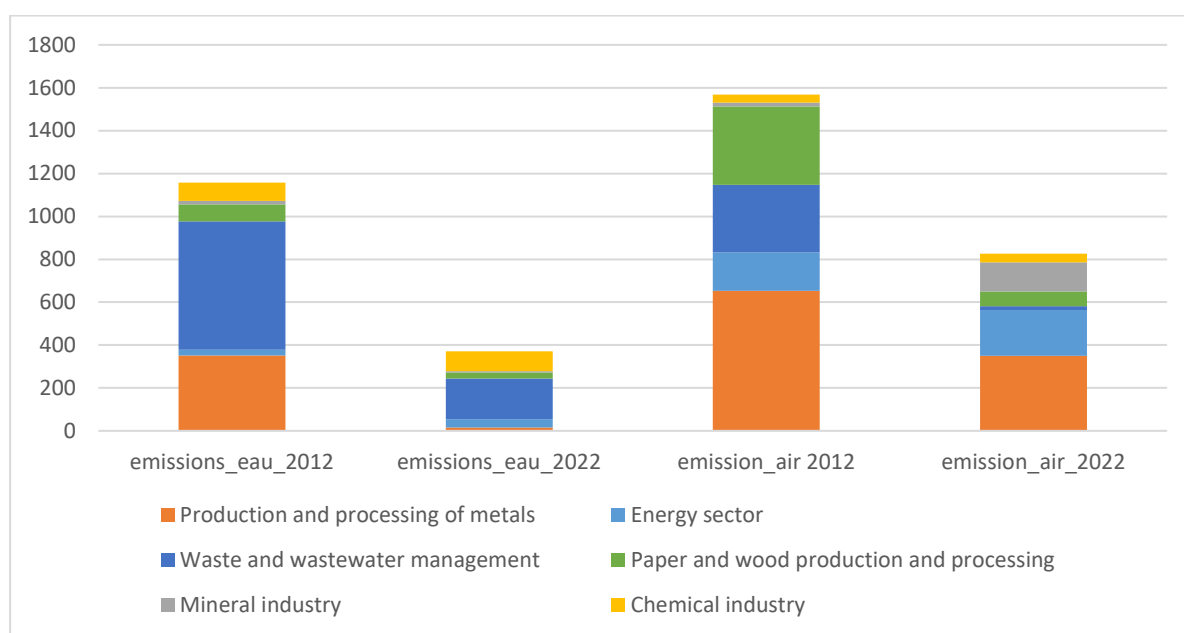


Figure 5. Rejets du cadmium en kg par type d'activité industrielle en France dans l'air et l'eau en 2012 et 2022 (Source : European Environment Agency, European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR), 2022)

Détails concernant les rejets de cadmium dans les sols et les eaux de surface et souterraines

Ces dernières décennies, l'exploitation minière industrielle, les gaz résiduels de fusion et scories, l'utilisation de combustibles fossiles, la galvanoplastie et l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés ont entraîné une contamination environnementale significative par le cadmium des eaux et des sols. Depuis les deux dernières décennies, les renforcements réglementaires (ICPE, lois cadre sur l'eau et l'air) ont cependant engendré une réduction de la part des rejets de cadmium dans le sol français liée aux activités industrielles. En effet, en

¹⁸ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/heavy-metal-emissions-in-europe> (publié le 16 septembre 2025)

¹⁹ <https://industry.eea.europa.eu/>

²⁰ Note : pas de données pour les sols en 2022. En 2014, les émissions de Cd dans les sols étaient de 19,6 kg, en baisse significative par rapport à l'année 2005 (rapport INERIS Brignon et al 2017)

2007, les émissions ponctuelles de cadmium vers les sols en France ont atteint 261 kg notamment en provenance de diverses activités industrielles : production de papier (34 %), abattoirs (29%), traitement des eaux usées (19%) et industrie chimique (11%) (Brignon et al 2017, à partir des données E-PRTR 2016). En 2014, les émissions de cadmium des sources industrielles ont été abaissées à 19,6 kg, principalement du fait du traitement des eaux usées. En 2014, la part la plus importante des apports anthropiques en cadmium dans les sols en France (environ 55 %) provenait des sources agricoles *via* l'usage des engrais minéraux phosphatés (Belon et al, 2012 ; Bottin et al. 2014).

En 2012, le rejet de cadmium dans l'eau provenant des sources industrielles était fortement lié à l'industrie métallurgique. **En 2022, les émissions de tous les secteurs ont nettement diminué. Les stations de traitements de déchets et des eaux usées sont les principales sources ponctuelles de cadmium (Figure 5). D'après Brignon et al. (2017), les apports diffus et indirects (engrais, apports atmosphériques, eaux de drainage...) seraient plus importants que les apports directs industriels.**

Détails concernant les rejets de cadmium dans l'air

Les émissions atmosphériques de cadmium présentées émanent de l'Observatoire MERA (Mesure et Évaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance) faisant partie du dispositif national de surveillance de la pollution atmosphérique. Douze stations de mesure réparties sur l'ensemble du territoire français métropolitain surveillent et caractérisent la pollution atmosphérique mesurée dans des zones rurales. Les données sont rendues disponibles dans les bases de données de qualité de l'air nationale (LCSQA Geod'Air) et européenne (EMEP EBAS).

D'après le CITEPA²¹, les émissions atmosphériques en France ont été divisées par 10 entre 1990 et 2022, pour s'établir à environ 2,6 t.an⁻¹ depuis quelques années. Le rejet industriel constitue la source majeure des émissions atmosphériques de cadmium en France en 2022 (68 %), suivie du transport routier (19%).

Selon Brignon et al. (2017), le cadmium et ses composés sont peu ou ne sont pas volatils. Le devenir du cadmium dans l'atmosphère est lié à la durée de vie des particules porteuses (d'une journée à une semaine) qui peuvent parcourir des centaines de kilomètres. En France, le Ministère de la Transition écologique et solidaire a mis en place un inventaire national spatialisé²² (INS) des émissions de polluants par secteur d'activité dans l'air depuis 2003. Les données spatialisées montrent que la région Nord-Pas-de-Calais était la plus émettrice de cadmium en 2012 (561 kg), suivaient ensuite les émissions des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (214 kg) et Île de France (190 kg).

En 2022, les rejets dans l'air restent associés aux activités de sidérurgie et métallurgie, de l'énergie et plus généralement de l'utilisation des ressources et combustibles fossiles (**Figure 6**). A noter que des émissions issues de sols pollués peuvent dégrader la qualité de l'air ou d'autres milieux (érosion et transfert) même si l'activité industrielle s'est arrêtée, du fait de l'envol de particules de sols nus. Selon la **Figure 6**, le raffinage du pétrole (secteur de l'énergie) et l'industrie des métaux (industrie manufacturière) représentent les deux activités les plus émettrices de cadmium dans l'atmosphère.

²¹ Association à but non-lucratif produisant des connaissances sur les polluants atmosphériques et gaz à effet de serre, en soutien aux décisions des acteurs concernés (www.citepa.org/qui-sommes-nous/)

²² <https://www.citepa.org/inventaires-spatialises/>

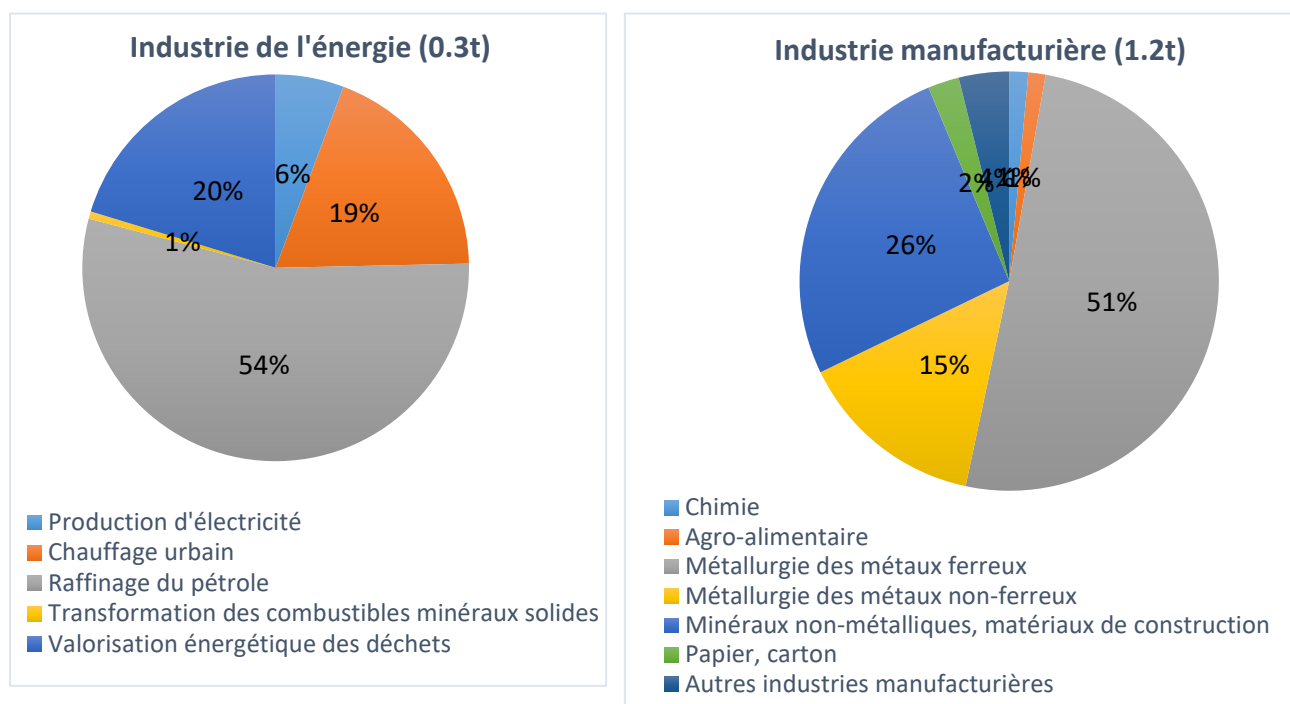


Figure 6. Émissions de cadmium dans l'atmosphère en France par secteur en 2022 (Figure réalisée à partir des données CITEPA.CITEPA (2023). Inventaire national des émissions atmosphériques en France – Rapport SECTEN, édition 2023)

En conclusion, les rejets anthropiques du cadmium dans l'environnement (air et eaux) constituent une source pertinente à intégrer dans la présente expertise, nécessitant d'étudier plus en détails les différentes sources anthropiques de cadmium (cf. section 4.3).

4.3 Sources anthropiques de cadmium

4.3.1 Sources en lien avec les activités agricoles

Différentes sources agricoles de cadmium ont été identifiées par le GT, avec des contributions d'apport de cadmium dans les sols pouvant être relativement importantes.

4.3.1.1 Différentes sources de cadmium et parts respectives

L'analyse de la littérature réalisée par le GT confirme que les activités agricoles sont à l'origine d'apports de cadmium aux sols par différents processus :

- utilisation d'engrais minéraux (essentiellement engrais phosphatés),
- épandage de boues de stations d'épuration (STEP) et de composts,
- épandage d'effluents d'élevage,
- cyclisation biologique du cadmium issu du fond pédo-géochimique naturel présent dans les horizons profonds.

En France, sur la base des résultats de l'étude de l'Ademe-Sogreah (2007, 2012), Belon et al. (2012) en 2012, et repris par l'Anses (2019), la contribution en pourcentage des flux d'apports moyens en cadmium apportés par différentes sources sur les sols agricoles français représente une part respective de :

- 54 % pour les fertilisants minéraux,
- 25 % pour les effluents d'élevage,
- 14% pour les retombées atmosphériques,
- 5% pour les boues et les composts.

Les engrais minéraux phosphatés et les effluents d'élevage représentaient en moyenne 80% des flux annuels. Il existe cependant une importante variabilité locale concernant les apports des différentes sources (**Figure 7**, Belon et al. 2012) : les engrais minéraux phosphatés constituaient les $\frac{3}{4}$ des apports dans des départements comme la Marne, l'Aube, l'Eure et Loir ou le Loiret, qui correspondent à des zones de grande culture, alors que les effluents d'élevage pouvaient représenter la moitié des apports dans les zones d'élevage porcin ou bovin : Finistère, Côtes d'Armor, Île et Vilaine, Doubs, Haute-Saône, Vosges, Haute-Savoie, Haute-Loire.... La part des boues et composts était plus élevée à proximité des grandes agglomérations : couronne parisienne, Bouches-du-Rhône.

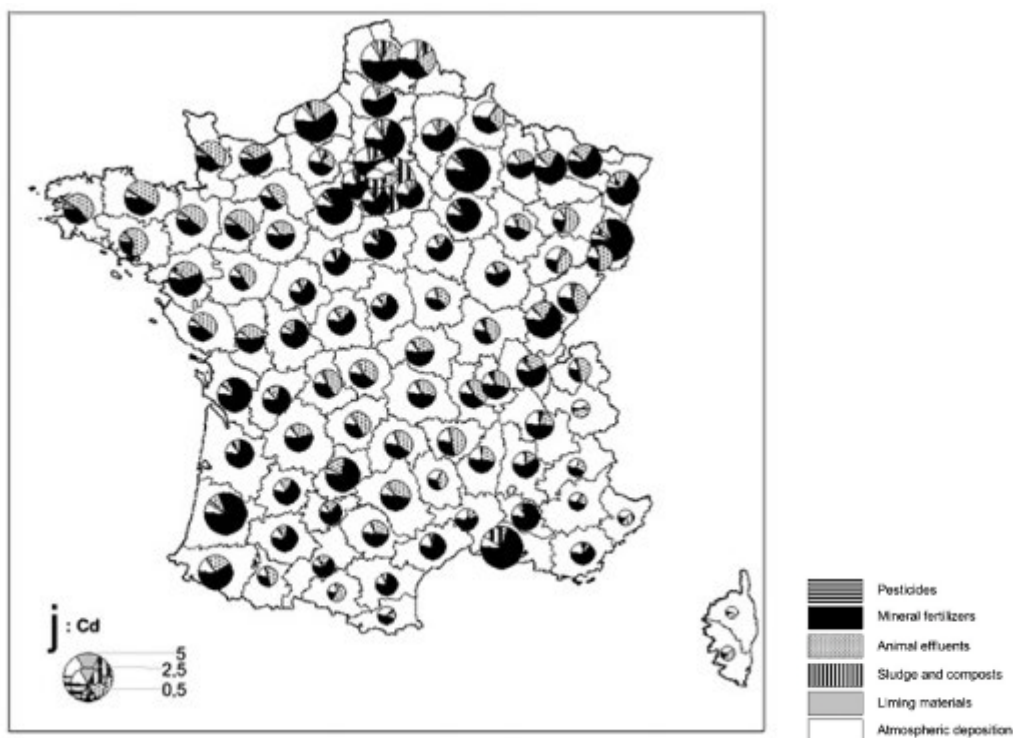


Figure 7. Apports annuels de cadmium ($\text{g ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) et contribution relative des différentes sources (%) dans les sols des départements français (Belon et al. 2012)

Fan et al. (2022) ont comparé les entrées et les sorties de cadmium dans les sols agricoles en Chine, au Japon et en Europe. Ces auteurs montrent que la voie prédominante d'apports de cadmium dans les sols agricoles diffère selon les régions du monde. En Europe, les apports de cadmium par les retombées atmosphériques, l'application d'engrais minéraux ou l'irrigation sont d'égale importance, tandis qu'en Chine, la voie atmosphérique est prédominante, suivie

de l'irrigation et de l'épandage d'effluents d'élevage. Le lessivage est la principale voie de sortie du sol du cadmium en Europe et au Japon. L'exportation par la récolte des cultures est la voie de sortie du sol majeure en Chine, mais les flux de sortie par lessivage et ruissellement sont également importants.

4.3.1.2 Engrais minéraux phosphatés

Les engrais à base d'azote, de potassium et de soufre ne contiennent pas de cadmium en quantité significative. Cependant, les engrais minéraux phosphatés constituent une source majeure d'apports de cadmium dans les sols agricoles (McLaughlin et al., 2021) en raison de la présence naturelle de cet élément dans les roches phosphatées, qui sont les matériaux naturels à la base de leur production. Les concentrations en cadmium sont peu élevées ($<1 - 4 \text{ mg kg}^{-1}$) dans les gisements d'origine ignée tels que ceux d'Afrique du Sud ou de Russie, alors qu'elles sont variables et peuvent être très élevées ($1 - 150 \text{ mg kg}^{-1}$) dans les roches phosphatées issues de dépôts sédimentaires, telles que celles du Maroc, des États-Unis, de la Tunisie, du Sénégal ou du Togo (Roberts, 2014). Ces différences et cette variabilité ont aussi été mentionnées par Kubier et al. (2019) (cf. **Figure 8**, concentrations en $\text{mg Cd kg}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$).

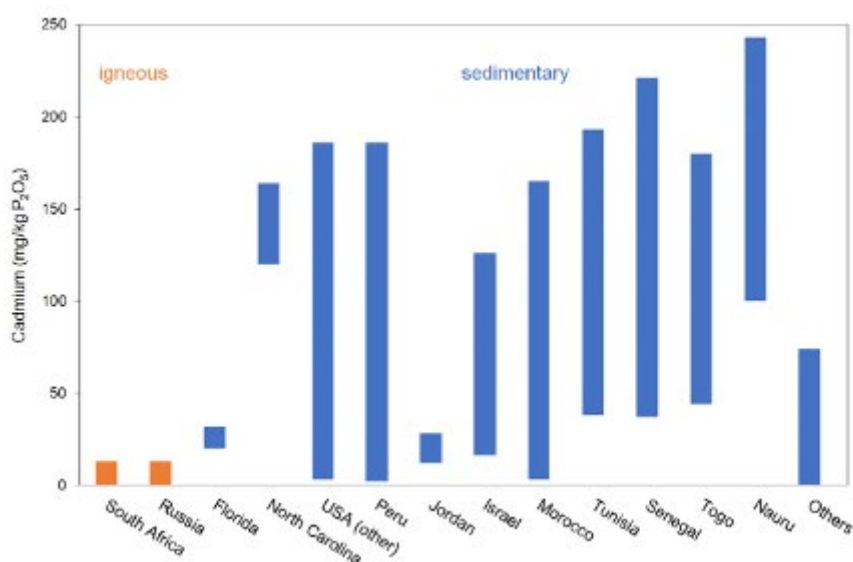


Figure 8. Concentrations en cadmium ($\text{mg Cd kg}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5$) des roches phosphatées en fonction de leur origine géographique (Kubier et al., 2019)

A l'échelle européenne, Nziguheba et Smolders (2008) ont analysé 196 échantillons de fertilisants collectés dans 12 pays européens et ont montré que les concentrations s'échelonnaient de moins de 0,2 jusqu'à $275 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{P}$ avec une moyenne égale à $82,7 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{P}$.

Six et Smolders (2014) considèrent les engrais minéraux phosphatés comme la principale source de cadmium dans les sols agricoles européens.

Sterckeman et al. (2018 et 2019) ont évalué l'évolution possible au cours des 100 prochaines années des concentrations en cadmium dans les sols français : en appliquant les taux de lessivage proposés par Six et Smolders (2014), Sterckeman et al. (2018, 2019) montrent qu'en considérant un faible taux de lessivage (plus réaliste, selon les auteurs), la teneur moyenne

en cadmium dans les sols augmenterait de 15 % au bout d'un siècle, sans prendre en compte les probables modifications des conditions environnementales qui pourront se produire. Outre ce lessivage plus faible dans les sols français, deux autres facteurs sont mis en avant pour rendre compte de cette différence avec les travaux européens par Six et Smolders (2014) : un taux d'application de phosphore plus élevé en France qu'en Europe et une teneur en cadmium plus élevée dans les engrais minéraux phosphatés utilisés en France. Selon ces auteurs, l'application stricte de bonnes pratiques de fertilisation phosphatée stabiliserait la teneur future en cadmium des sols à son niveau actuel, alors que la combinaison des bonnes pratiques de fertilisation phosphatée et une teneur en cadmium abaissée dans les engrais minéraux phosphatés conduirait à une diminution de la teneur en cadmium des sols comprise entre 3,0 % et 5,2 %.

L'Anses (2019) et Carne et al. (2021) ont étudié par une approche de bilan massique l'impact sur les risques sanitaires d'une réduction de la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés. Il est démontré que, quels que soient l'engrais et le scénario de fertilisation considérés, un flux inférieur à $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ réduit à la fois l'accumulation dans les sols et le transfert du cadmium tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires. Une teneur en cadmium inférieure ou égale à $20 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ dans les engrais minéraux phosphatés permet d'atteindre le respect de ce flux.

La concentration en cadmium fixée par l'Union européenne (UE) dans le règlement UE 2019/1009²³ demeure cependant bien supérieure, puisque la limite pour la commercialisation des engrais minéraux phosphatés sur le marché européen est actuellement de $60 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ soit $137 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}$. La proportion d'engrais minéraux phosphatés utilisés en Europe qui dépasse cette limite a été estimée à 8 % (Verbeek et al. 2020).

McLaughlin et al. (2021) pointent le fait que des études (telles que Williams et al., 1976 ; Kashem et Singh, 2002) montrent que les concentrations en cadmium dans les plantes cultivées s'élèvent avec l'augmentation des contenus en cadmium dans les sols à la suite des épandages d'engrais minéraux phosphatés. McLaughlin et al. (2021) considèrent également que la mise en œuvre de teneurs abaissées et la décadmiation des roches phosphatées ou de l'acide phosphorique constituent des options d'actions pour réduire les apports de cadmium dans les sols agricoles (cf. chapitre 7).

En outre, l'enrichissement des sols en cadmium par les engrais minéraux phosphatés ne se limite pas aux seules grandes cultures : Zhong et al. (2021) ont par exemple montré qu'ils constituent la deuxième source de cadmium pour les sols des jardins urbains en France.

4.3.1.3 Matières fertilisantes d'origine résiduaire, eaux usées, boues et autres biosolides

Les matières fertilisantes autres que les engrais minéraux phosphatés, incluant les eaux usées, les boues d'épuration et autres biosolides, constituent une source non négligeable de cadmium dans les sols agricoles.

Les concentrations en cadmium dans ces matrices varient en fonction de leur origine et des procédés utilisés. McLaughlin et al. (2021) indiquent que, dans de nombreux pays, ces

²³ Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE

concentrations ont fortement diminué au cours du temps en raison de la mise en œuvre de réglementations environnementales. Cependant, des écarts significatifs subsistent :

- Boues d'épuration : aux États-Unis, Mortvedt (1996) rapportait des teneurs qui variaient entre 1 et 3410 mg Cd kg⁻¹ de matière sèche (MS), alors qu'en Europe, Nicholson et al. (2005) ont estimé la concentration moyenne à 2,0 mg Cd kg⁻¹ MS, dans une gamme comprise entre 0,4 et 3,8 mg Cd kg⁻¹ MS.
- Composts, digestats, effluents d'élevage : les concentrations de cadmium varient généralement entre 1 et 70 mg Cd kg⁻¹ MS, selon les sources et les méthodes de traitement (Belon et al. ; 2012)
- Eaux usées et irrigation : dans certains pays, des cultures ont parfois été irriguées directement avec des eaux usées non traitées, entraînant une accumulation significative d'éléments traces métalliques dans les sols et les plantes. En Chine, Meng et al. (2016) ont montré que le blé irrigué par des eaux usées pouvait contenir des teneurs en cadmium dépassant la limite réglementaire pour la consommation humaine de 0,2 mg kg⁻¹.

Hudcova et al. (2019) rapportent que dans les 13 pays européens pour lesquels des données sont disponibles, plus de 20% des boues produites sont utilisées en agriculture. En France, en 2014, ce sont 45% des boues produites qui ont été épandues : la production de boues en France était égale à 961 kt en 2014, dont 421,3 kt ont été utilisés en agriculture et 305,1 kt ont été compostées. Ces tonnages représentaient 5% du cadmium total apporté aux sols français, mais leur épandage était variable selon la localisation : ils pouvaient être par exemple beaucoup plus importants à proximité des grandes agglomérations (ADEME, 2007). En 2022, l'augmentation de la production de boues s'est accompagnée d'une modification des filières de valorisation : près des trois quarts des 1123 kt de boues produites ont fait l'objet d'une valorisation agronomique, épandues en agriculture (333,3 kt) ou compostées (526,8 kt)²⁴.

Nunès et al. (2021) constatent que la quantité de biosolides (boues et composts) épandue sur les sols agricoles européens est globalement stable, même si l'année 2017 marque une diminution sensible. Ces auteurs insistent sur la nécessité d'une réglementation stricte et de lignes directrices adaptées pour encadrer l'utilisation des biosolides en agriculture et les contaminations métalliques des sols agricoles qu'elles induisent. En accord avec les précédents avis de l'Anses (2019) concernant les engrais minéraux phosphatés, les auteurs soulignent aussi le risque que des lessivages de métaux lourds puissent se produire à l'issue de l'application prolongée de boues d'épuration et de composts.

4.3.1.4 Effluents d'élevage

Un inventaire des apports de cadmium dans les sols par les épandages d'effluents d'élevage a été réalisé en utilisant les données recueillies dans 215 pays de 2000 à 2014 par Leclerc et Laurent (2017).

Les déjections des différents animaux d'élevage montrent des contenus en cadmium variables en fonction de l'espèce animale (Leclerc et Laurent, 2017) : fientes de canard (22,5 mg Cd kg⁻¹ de contenu en azote (N)), fumier de porc (17,9 mg Cd kg⁻¹ N), déjections de mouton et de chèvre (14,1 mg Cd kg⁻¹ N), fumier de bovins (12,5 mg Cd kg⁻¹ N), fientes de poulet (8,0 mg

²⁴ Eurostat : https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wv_spd/default/table?lang=fr

Cd kg⁻¹ N). A l'échelle de la France métropolitaine, les déjections animales représentent la deuxième source d'entrée de cadmium dans les sols agricoles (25%) selon Belon et al. (2012). La part prise par les effluents d'élevage correspond au fait que même si les teneurs en cadmium des déjections sont faibles, les quantités produites et épandues en France sont élevées et ont pour conséquence de leur donner un poids relatif important en termes de flux d'apport de cadmium.

En conclusion, par leur contribution, les sources agricoles représentent une source pertinente de cadmium à intégrer dans la présente expertise.

4.3.2 Sources industrielles

4.3.2.1 Réglementations ICPE et REACH

Le cadmium est soumis à autorisation dans la réglementation française des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/savoir-icpe-nomenclature-gestion-declaration>). Il est cité dans plusieurs rubriques ICPE pour son utilisation en tant que : revêtement métallique ou traitement, nettoyage, décapage, conversion dont phosphatation, polissage, attaque chimique, vibro-abrasion, ainsi que dans la production, transformation des métaux et alliages non ferreux.

De plus, effectif depuis juin 2008 en Europe, le règlement REACH (*Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals*) établit les exigences que les fabricants, les importateurs et les utilisateurs de substances chimiques doivent respecter au sein de l'UE. Au-delà de l'enregistrement, et en fonction du niveau de dangerosité des substances, différents processus tels que la restriction et l'autorisation peuvent être mis en place pour gérer de manière optimale les risques pour l'environnement et la santé humaine tout au long du cycle de vie de ces substances. Le règlement REACH permet également d'avoir des informations sur les usages et les volumes de cadmium utilisés par les entreprises en Europe²⁵.

Le cadmium et ses composés ont été classés comme substances extrêmement préoccupantes par la réglementation REACH, en raison de leurs effets cancérogènes, mutagènes et toxiques sur l'environnement, la santé et la reproduction. Des restrictions sur les usages du cadmium ont ensuite été étendues. Une des restrictions clés est que le cadmium ne doit pas être utilisé dans des mélanges et des articles fabriqués à partir des polymères organiques synthétiques (plastiques)²⁶. Les mélanges et articles fabriqués à partir de matières

²⁵ <https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table/-/dislist/details/0b0236e1807dd024>

<https://www.reach-cadmium.eu/cd-consortium-info/cadmium-substance-list>

²⁶ Polymères ou copolymères de chlorure de vinyle (PVC) [3904 10] [3904 21] — polyuréthane (PUR) [3909 50] — polyéthylène basse densité (LDPE), à l'exception du polyéthylène basse densité utilisé pour la production de produits colorés mélange maître [3901 10] — acétate de cellulose (CA) [3912 11] — acétate-butyrat de cellulose (CAB) [3912 11] — résines époxy [3907 30] — résines mélamine-formaldéhyde (MF) [3909 20] — urée-formaldéhyde (résines UF) [3909 10] — polyesters insaturés (UP) [3907 91] — polyéthylène téréphtalate (PET) [3907 60] — polytéréphtalate de butylène (PBT) — polystyrène transparent/à usage général [3903 11] — méthacrylate de méthyle d'acrylonitrile (AMMA) — polyéthylène réticulé (VPE) — polystyrène choc — polypropylène (PP) [3902 10] — polymères ou copolymères de chlorure de vinyle (PVC) [3904 10] [3904 21] — polyuréthane (PUR) [3909 50] — polyéthylène basse densité (LDPE), à l'exception du polyéthylène basse densité utilisé pour la production de produits colorés mélange maître [3901 10] — acétate de cellulose (CA) [3912 11] — acétate-butyrat de cellulose (CAB) [3912 11] — résines époxy [3907 30] — résines mélamine-

plastiques ne doivent pas être mis sur le marché si la concentration de cadmium (exprimée en Cd métal) est égale ou supérieure à 0,01 % en poids de la matière plastique.

De plus, le cadmium ne doit pas être utilisé ou mis sur le marché si la concentration est égale ou supérieure à 0,01 % en poids du métal dans les perles métalliques et autres composants métalliques pour la fabrication de bijoux ; les parties métalliques de bijoux et d'articles de bijouterie d'imitation et d'accessoires pour cheveux, y compris bracelets, colliers et bagues, bijoux de piercing, — montres bracelets et articles de poignet, — broches et boutons de manchette.

4.3.2.2 Activités industrielles susceptibles d'être émettrices de cadmium

Les sources de cadmium dans les divers compartiments de l'environnement peuvent être d'origine industrielle et proviennent en grande majorité de l'industrie chimique et électrique, du raffinage des métaux non ferreux, des accumulateurs nickel-cadmium, du traitement des surfaces métalliques (revêtement anticorrosion), de la métallurgie de l'acier, et de la combustion du charbon et des produits pétroliers (Brignon et al. 2017). Les activités industrielles émettant du cadmium ont varié au fil du temps en raison de l'évolution des réglementations, des technologies et des pratiques industrielles (voir également chapitre 6). En 2023, la liste générale des activités industrielles susceptibles d'être potentiellement émettrices de cadmium en France est la suivante (CITEPA, 2023) :

1. Industries de fabrication et de transformation des métaux :

- o Fusion et affinage du zinc
- o Fusion et affinage du cuivre
- o Production d'acier
- o Installations de production de cadmium
- o Fabrication de batteries nickel-cadmium

2. Opérations d'exploitation minière et de traitement du minerai :

- o Extraction et transformation du zinc
- o Extraction et transformation du plomb
- o Extraction du cadmium

3. Fabrication et transformation de produits chimiques :

- o Production de pigments et colorants contenant des composés du cadmium
- o Fabrication de matières plastiques, notamment celles contenant des stabilisants au cadmium
- o Production de composés à base de cadmium pour des applications industrielles

4. Installations d'incinération des déchets :

- o Incinération des déchets solides municipaux
- o Incinération des déchets dangereux

formaldéhyde (MF) [3909 20] — urée-formaldéhyde (résines UF) [3909 10] — polyesters insaturés (UP) [3907 91] — polyéthylène téréphtalate (PET) [3907 60] — polytéréphtalate de butylène (PBT) — polystyrène transparent/à usage général [3903 11] — méthacrylate de méthyle d'acrylonitrile (AMMA) — polyéthylène réticulé (VPE) — polystyrène choc — polypropylène (PP) [3902 10]

5. Fabrication électronique :

- o Production de composants électroniques contenant du cadmium, tels que les semi-conducteurs
- o Recyclage des déchets électroniques comportant des composants contenant du cadmium

6. Industries aérospatiales et de défense :

- o Procédés de fabrication impliquant des alliages ou des revêtements contenant du cadmium pour des composants d'avions

7. Fabrication de céramique et de verre :

- o Production d'émaux ou de pigments contenant du cadmium pour la céramique et les produits en verre

8. Production d'engrais :

- o Certains engrais phosphatés peuvent contenir du cadmium comme traces, en particulier ceux dérivés de certaines sources de roche phosphatée

9. Traitement des métaux non ferreux :

- o Le cadmium peut être présent en quantités mineures dans divers métaux non ferreux

10. Installations de recyclage des batteries :

- o Recyclage des piles au nickel-cadmium ou d'autres piles contenant du cadmium.

La section suivante est focalisée sur quelques sources industrielles du cadmium liées au secteur de la métallurgie, des déchets et recyclage des métaux et des transports, identifiées comme pertinentes pour les travaux. Le secteur de la production d'engrais identifié aussi comme un secteur pertinent a été précédemment évoqué en section 4.3.1 sur les sources agricoles.

4.3.2.3 Sources liées au secteur des déchets et recyclage des métaux

De manière générale, selon plusieurs sources, les procédés de traitement et de recyclage des déchets (y sont inclus l'incinération des déchets ménagers, le recyclage de déchets électriques et électroniques) sont considérés comme émetteurs de cadmium dans l'air, l'eau et le sol (ATDSR 2012, EFSA 2009, UNEP 2020, *Nordic Council of Ministers* 2003, CITEPA 2023).

En France, le traitement des déchets contribuait en 2021 pour 6% à l'émission de cadmium (CITEPA 2023). La **Figure 9** montre l'évolution des contributions aux émissions de cadmium entre 1990 et 2021.

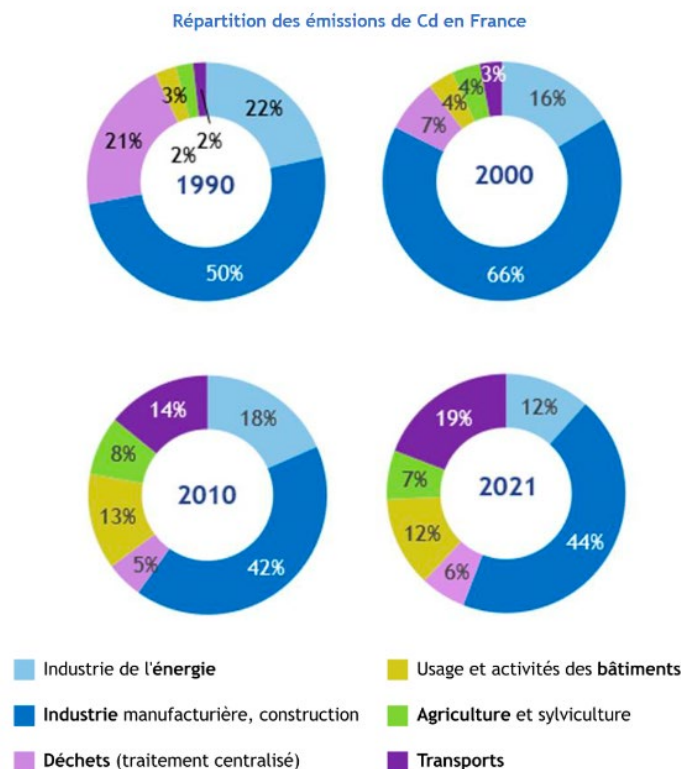


Figure 9. Répartition des émissions de cadmium en France et évolution entre 1990 et 2021 (source : CITEPA, 2023)

L'INERIS (2016) indique que les stations de traitements de déchets et des eaux usées sont les principales sources ponctuelles de contamination des milieux aquatiques par le cadmium alors que les rejets dans l'air sont associés aux activités de sidérurgie et métallurgie, de l'énergie et plus généralement de l'utilisation des ressources et combustibles fossiles. Dans les sols, la principale source est l'utilisation des engrais minéraux phosphatés.

L'action RSDE (recherche et réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux) a montré que l'incinération des déchets ménagers contribuait en 2014 pour 7% aux émissions de cadmium (**Figure 10**).

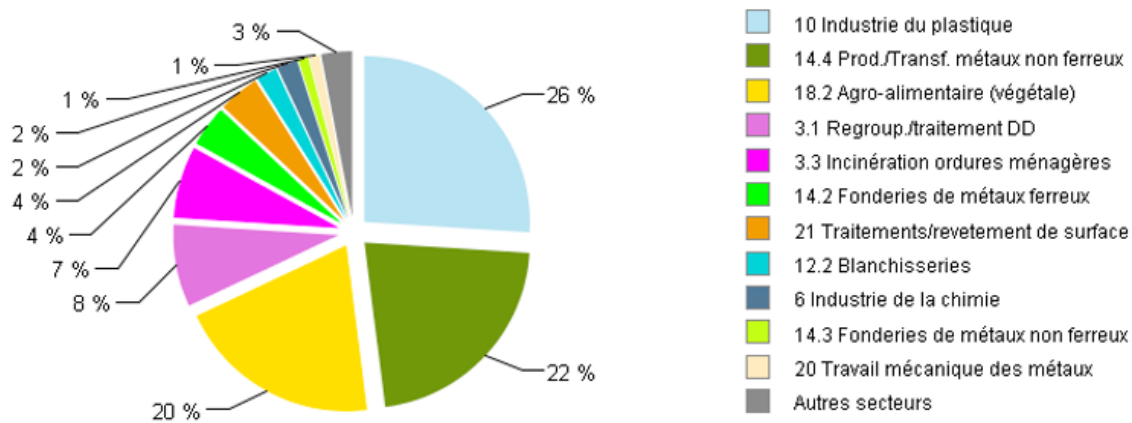


Figure 10. Secteurs contributeurs aux émissions de cadmium et part des flux cumulés de chaque secteur par rapport aux flux cumulés totaux (source : INERIS 2016)

Kubier et al. (2019), sur la base d'une revue de la littérature, indiquent que, au niveau mondial, dans les années 90, l'incinération de déchets aurait été responsable de l'émission atmosphérique de 40 tonnes par an, en moyenne, sur un total de 43 600 tonnes de cadmium par an émises dans l'atmosphère.

Enfin, les sites de traitement des déchets électroniques sont également rapportés dans plusieurs études comme étant des émetteurs de cadmium et/ou responsables d'une exposition importante des populations vivant à proximité de ces sites (Ni et al. 2014 ; Rautela et al. 2021 ; Frazzoli et al. 2022 ; Parvez et al. 2021 ; Gravel et al. 2023).

4.3.2.4 Sources liées aux transports

Les rejets de cadmium dans l'environnement en lien avec les transports proviennent de :

- L'abrasion de pièces métalliques : l'usure des pièces métalliques des véhicules, comme les plaquettes de frein et les composants de moteur, peut libérer des particules de cadmium.
- L'abrasion des pneus sur la chaussée : l'usure des pneus, qui contiennent souvent des composés de cadmium, ainsi que l'abrasion des revêtements routiers peuvent contribuer aux émissions de cadmium. Ces processus peuvent générer des particules fines en suspension (notées PM en anglais pour *Particulate Matter*) (PM) (PM10, PM2.5), qui pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire.
- La remise en suspension des particules : les particules de cadmium présentes sur la chaussée peuvent constituer une source secondaire (ré-envol) en étant remises en suspension par le passage des véhicules, augmentant la concentration de cadmium dans l'air ambiant, surtout dans les zones à fort trafic, ou bien être mobilisées par ruissellement lorsqu'il pleut.
- La combustion du carburant : bien que la contribution de cette source soit moindre depuis l'introduction des filtres à particules et de carburants plus propres, une partie du cadmium peut toujours être libérée par la combustion des carburants fossiles.

Les études sur les particules en suspension (PM10) dans les grandes villes montrent que le cadmium y est présent, mais les données spécifiques sur les particules PM1 et PM2.5 sont limitées. Ces particules fines sont pourtant cruciales car elles sont plus susceptibles de contenir des métaux lourds comme le cadmium et de pénétrer profondément dans les poumons (Puisney-Dakhli et al., 2023).

En France, les données sont particulièrement rares, et les études disponibles ne distinguent pas toujours les sources précises d'émissions de cadmium liées aux transports. Cette absence de spécificité dans les études pose un défi pour évaluer précisément l'impact des transports sur les niveaux de cadmium dans l'air.

En outre, les zones agricoles situées à proximité des infrastructures routières peuvent être contaminées par le dépôt de particules contenant du cadmium affectant ainsi la qualité des sols et des cultures.

En conclusion, faute de données suffisantes sur les flux de cadmium occasionnés par les activités de transport, cette source de cadmium ne pourra pas être tracée en tant que telle, mais elle sera indirectement prise en compte dans la modélisation de

l'exposition par l'air, l'eau et le sol, dans la suite de l'expertise. Les sources de cadmium liées aux transports restent une préoccupation majeure, nécessitant des recherches et des interventions ciblées pour caractériser et minimiser l'exposition de la population et préserver la qualité de l'environnement.

4.4 Sources liées aux produits du tabac et produits connexes

4.4.1 Présence et origine du cadmium dans les produits du tabac et produits de vapotage

4.4.1.1 Produits du tabac

La présence de cadmium dans les produits du tabac constitue une source d'exposition préoccupante pour les consommateurs. Dans le cadre de la directive 2014/40/UE sur les produits du tabac, les fabricants ne sont pas tenus de déclarer la présence de contaminants tels que le cadmium dans leurs dossiers d'enregistrement, y compris dans les données relatives aux émissions. En effet, en France, pour la mise sur le marché de produits du tabac, le code de la santé publique (L-3512-16 CSP) ne fixe d'obligations déclaratives relatives à la composition des produits que pour certains additifs (substances ajoutées intentionnellement par les fabricants), et non les ingrédients et contaminants qu'ils sont susceptibles de contenir. En matière d'émissions, les obligations déclaratives ne portent que sur les substances faisant l'objet de teneurs maximales réglementaires (nicotine, goudrons, monoxyde de carbone) (L-3512-15 CSP) (Anses, 2022).

Ganguly et al. (2018) rapportent une teneur en cadmium dans les feuilles de tabac entre 1 et 2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de poids sec, et entre 0,5 et 1 μg par cigarette, soit entre 10 et 20 μg pour un paquet de 20 cigarettes. A l'échelle internationale, des travaux conduits par l'industrie du tabac à partir de 568 prélèvements²⁷ de tabac de cigarettes à travers le monde indiquent des valeurs médiane et moyenne de 0,769 et 0,898 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$ de tabac, respectivement. Les valeurs seuils des premiers et troisièmes quartiles étaient de 0,645 et 0,998 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivement, tandis que les valeurs minimales et maximales descendaient à 0,187 et montaient à 4,672 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$ de tabac (Piadé et al., 2015). D'autres travaux montrent que ces teneurs peuvent varier selon les pays, dans le temps et entre les marques. Par exemple, l'état des études publiées sur les métaux dans le tabac des cigarettes dressé par Benson et al. (2017) présente des teneurs moyennes en cadmium variables selon les pays (0,18 à 3,2 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$), mais leurs valeurs mesurées au Nigéria sont plus élevées (5,90-7,94 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$). Ces valeurs moyennes sont plus élevées que celles rapportées par des études américaines en 2009 (0,86 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$ de tabac sans différence significative entre les fabricants selon Caruso et al., 2015) et 2011 (entre 1,0 et 1,7 $\mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$ de tabac selon la marque de cigarettes analysée (n=50) par Fresquez et al., 2013).

Le tabac est une plante exigeante en phosphore, et les engrais minéraux phosphatés utilisés pour améliorer le rendement, sont une source importante de cadmium. Or, la plante de tabac

²⁷ Les prélèvements provenaient de cigarettes commercialisées par 27 fabricants, dans 23 pays, entre 2008 et 2012. L'échantillonnage couvrait une diversité de formats de cigarettes. 23 prélèvements ont été effectués en France. Les résultats spécifiques à chaque pays n'ont pas été communiqués.

est capable d'absorber fortement et d'accumuler le cadmium présent dans le sol, qui s'accumule dans ses feuilles (Pappas, 2011).

En France, les activités de la filière tabac sont en baisse : en 2023, selon FranceAgriMer (2025), la France est 60^e producteur mondial et 11^e importateur en valeur. En France, il n'y a plus de manufacture de produits à fumer depuis 2017, et plus de filière de première transformation depuis 2019, bien qu'il subsiste quelques cultures et entreprises de transformation. Les cigarettes de contrefaçon ou issues de circuits parallèles, pour lesquelles la production de tabac est peu ou non contrôlée, ont été aussi associées à une contamination accrue par le cadmium (Pappas et al., 2007 ; He et al., 2015). Selon un rapport de Santé Publique France et l'OFDT (2024), le marché parallèle de tabac est estimé par des organismes publics entre 10 et 20%, ce qui est inférieur aux chiffres avancés par l'industrie du tabac.

4.4.1.2 Produits de vapotage

En ce qui concerne les produits de vapotage, la situation diffère. Bien qu'il n'existe pas, de même, d'obligation réglementaire de déclaration des contaminants, des données déclaratives par les fabricants permettent de disposer de résultats d'analyses, incluant les teneurs en cadmium dans les émissions (Anses, 2020c). Dans son bilan sur la période 2016–2020, l'Anses (2020) a identifié le cadmium dans la liste de référence de 15 substances recherchées prioritairement dans les émissions par les déclarants. Cette liste comprend notamment des composés carbonylés générés lors du chauffage du e-liquide pour produire l'aérosol (formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine...) et des métaux (nickel, chrome, plomb, cadmium...). La présence de cadmium, entre autres métaux, dans les liquides et aérosols de produits du vapotage est également documentée dans la littérature (Zhao et al., 2020 ; Gaur et Agnihotri, 2019).

L'origine du cadmium dans les produits du vapotage semble différer de celle observée dans le tabac. L'exposition aux métaux dans les aérosols de produits du vapotage peut notamment provenir de leur migration dans le e-liquide à partir du dispositif de vapotage (atomiseur, soudures, autres pièces) (Batista et al., 2024 ; Zhao et al., 2020). Plusieurs revues de la littérature soulignent l'existence de variations marquées dans la concentration en métaux au sein et entre les catégories d'appareil et les marques de cigarettes électroniques (Besaratina, 2025 ; Granata et al. 2024 ; Travis et al., 2023). D'après Zhao et al. (2020), l'évolution rapide des appareils (puffs, pods, kits) complexifie l'étude de la contribution des cigarettes électroniques à l'exposition aux métaux/métalloïdes, tout comme la grande diversité de e-liquides.

Selon Gaur et Agnihotri (2019), la concentration des métaux est généralement plus élevée dans les aérosols que dans les e-liquides. Dans leur revue, Zhao et al. (2020) ont recensé 10 études ayant analysé la concentration en cadmium dans des échantillons de e-liquide et d'aérosol. Ils indiquent que les niveaux de cadmium étaient faibles, voire indétectables, dans plusieurs études.

D'après la revue de la littérature de Besaratinia (2025), la concentration en métaux tels que le chrome, le manganèse et le nickel serait généralement plus élevée dans les aérosols des cigarettes électroniques que dans la fumée de cigarette, tandis que les niveaux de cadmium auraient tendance à être plus faibles. Zhao et al. (2020) arrivent à une conclusion similaire, soulignant que par rapport aux cigarettes conventionnelles, les aérosols des cigarettes électroniques peuvent entraîner une exposition moindre au cadmium, mais pas aux autres métaux/métalloïdes toxiques présents dans le tabac.

4.4.2 Exposition au cadmium par les produits du tabac et de vapotage

Le tabac constitue une source importante, voire prédominante, d'exposition au cadmium chez les fumeurs. En France métropolitaine, en matière de prévalence du tabagisme, selon l'enquête EROPP²⁸ de l'Observatoire français des drogues et des tendances addictives (OFDT) réalisée en 2023, plus de trois personnes de 18-75 ans sur dix déclaraient fumer (31,1 %). Moins d'un quart déclarait fumer quotidiennement (23,1 %), avec un niveau plus élevé parmi les hommes (25,4 %) que parmi les femmes (20,9 %). Cette pratique est marquée par d'importantes inégalités sociales, la prévalence du tabagisme quotidien étant de 28,9 % chez les fumeurs à plus bas revenus contre 17,3% chez ceux à plus hauts revenus (Pasquereau et al., 2024). En 2024, le Baromètre de Santé publique France²⁹ met en évidence une diminution du tabagisme et du tabagisme quotidien, après la stagnation observée pendant la pandémie de Covid-19. Parmi les 18-75 ans en France hexagonale, la prévalence du tabagisme s'établit désormais à 25% contre 32% en 2021, et celle du tabagisme quotidien à 18% contre 25% trois ans plus tôt. Les auteurs rappellent que parmi les jeunes de 17 ans, le tabagisme a également diminué ces dernières années la proportion de fumeurs quotidiens étant de 15,6% en 2022 contre 25,1% en 2017. En 2024, le baromètre montre également une baisse nette parmi les jeunes adultes, la proportion de fumeurs quotidiens étant de 18,4% parmi les 18-29 ans en 2024, contre 29,3% en 2021. Les résultats indiquent que les inégalités sociales persistent. En 2024, le tabagisme quotidien était de 25,1% chez les ouvriers contre 11,8% chez les cadres, et de 30,0% parmi les personnes se déclarant en « difficulté » financièrement contre 10,1% parmi celles se déclarant « à l'aise ». Les auteurs précisent que ces premiers constats doivent être interprétés avec précaution, car la méthode de l'enquête a été ajustée en 2024 avec notamment l'introduction d'un nouveau mode de collecte par internet (Pasquereau et al., 2025).

Lors de la consommation de produits de tabac, il convient de distinguer la composition intrinsèque du produit (tabac, filtre, papier) et les substances réellement inhalées par le fumeur, c'est-à-dire les émissions issues de la combustion. Parmi ces émissions figure le cadmium, principalement sous forme de particules fines d'oxyde de cadmium. Ces particules, du fait de leur très faible taille (de l'ordre de 1,5 µm d'après ATSDR, 2012), peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires, où elles peuvent être à l'origine d'inflammations, et de l'aggravation de l'état de santé des personnes atteintes de maladies cardiaques et pulmonaires. En effet, une hausse de l'exposition au cadmium en lien avec le tabagisme a été associée à un déclin de la fonction ventilatoire pulmonaire et au diagnostic de maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC), la spécificité des effets du cadmium restant à préciser (Ganguly et al. 2018).

D'après l'ATSDR (2012), un fumeur consommant un paquet de cigarettes par jour absorberait en moyenne entre 1 et 3 microgrammes de cadmium quotidiennement. SpF, dans son rapport de 2021, confirme que la fumée de cigarette représente une source significative d'exposition au cadmium. L'enquête Esteban menée par SpF montre que les fumeurs présentent une imprégnation en cadmium supérieure de 53 % à celle des non-fumeurs. Un niveau augmenté de 16,3% était observé chez les ex-fumeurs par rapport aux non-fumeurs (Oleko et al. 2021).

²⁸ Enquête sur les représentations, opinions et perceptions sur les psychotropes

²⁹ Forte baisse du tabagisme en France : en 10 ans, 4 millions de fumeurs quotidiens en moins (publication : 2025) : <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2025/forte-baisse-du-tabagisme-en-france-en-10-ans-4-millions-de-fumeurs-quotidiens-en-moins>

Outre le tabac fumé, les produits de vapotage doivent également être considérés. En 2023, selon l'enquête EROPP³⁰ de OFDT, 8,3 % des 18-75 ans déclaraient vapoter. La prévalence du vapotage quotidien était de 6,1 % (6,8 % parmi les hommes et 5,4 % parmi les femmes). Ces proportions sont en hausse depuis 2016 (Pasquereau et al., 2024).

D'après Zhao et al. (2020), la littérature corrobore l'hypothèse selon laquelle les cigarettes électroniques sont une source d'exposition aux métaux/métalloïdes, la plupart des concentrations de ces éléments mesurées dans les échantillons biologiques étant similaires, voire supérieures, chez les utilisateurs de cigarettes électroniques par rapport aux utilisateurs de cigarettes conventionnelles dans les études recensées. Toutefois, ce n'était pas le cas du cadmium, pour lequel des taux urinaires significativement plus faibles ont été observés.

Gong et al. (2023) soulignent qu'une limite majeure rencontrée dans les travaux étudiés réside dans la description incomplète des caractéristiques des utilisateurs, tant pour les utilisateurs actuels de cigarettes électroniques, les fumeurs mixtes (tabac à fumer, vapotage), et surtout les anciens fumeurs de cigarettes conventionnelles. Ils soulignent qu'une partie des utilisateurs de cigarettes électroniques inclus dans les études épidémiologiques étaient d'anciens fumeurs (parfois la plupart) ou que leur statut tabagique n'est pas toujours renseigné ou collecté. Ils soulignent cet enjeu, notamment compte tenu de la demi-vie longue des métaux dans le corps humain, qui est par exemple d'environ 10 à 30 ans pour le cadmium : selon ces auteurs, les métaux présents dans les échantillons prélevés sur des utilisateurs de cigarettes électroniques pourraient donc contenir des résidus provenant de la consommation passée de cigarettes conventionnelles, ce qui appelle à la prudence dans l'interprétation des résultats.

De fait, il est à noter qu'un individu peut évoluer d'un tabagisme intensif à une consommation réduite, adopter le vapotage en parallèle, ou encore basculer entièrement vers la cigarette électronique. Ainsi, selon SpF (2025), en 2023, quasiment tous les vapoteurs quotidiens de 18-75 ans déclaraient une expérience avec le tabac. Selon des données de 2021, 55,5 % des vapoteurs quotidiens étaient également fumeurs, 43,7 % étaient des ex-fumeurs. Une minorité (0,9 %) déclarait n'avoir jamais fumé.

Par ailleurs, le tabagisme passif représente également une source potentielle d'exposition au cadmium. Le GT a constaté que les données sur le cadmium associées au tabagisme passif sont très limitées, tant pour les cigarettes traditionnelles que pour les produits de vapotage.

Enfin, le cadmium figure dans plusieurs listes officielles de substances toxiques prioritaires associées aux produits du tabac. Il est ainsi classé parmi les 93 composants préoccupants identifiés par la *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) dans les produits du tabac (FDA, 2012), ainsi que parmi les 39 substances de la liste de référence de l'OMS (WHO, 2015).

Sur le plan réglementaire européen, le cadmium (et plus spécifiquement l'oxyde de cadmium, forme inhalée *via* la fumée de cigarette) est considéré comme substance CMR, classée 1B pour la cancérogénicité, et 2 pour la mutagénicité et la reprotoxicité, conformément au règlement CLP (CE) n°1272/2008.

Des publications récentes s'intéressent à la contribution spécifique du cadmium à certaines pathologies liées au tabagisme. Par exemple, Gomez (2022) met en évidence les effets du cadmium et du monoxyde de carbone sur le développement fœto-placentaire. Ganguly et al. (2018) soulignent le besoin de recherches complémentaires pour mieux cerner les effets spécifiques du cadmium au niveau pulmonaire. Richter et al. (2017) recensent diverses pathologies en lien avec la charge en cadmium et en zinc chez les fumeurs. Kim et al. (2023)

³⁰ Enquête sur les représentations, opinions et perceptions sur les psychotropes

montrent une association entre l'accumulation de cadmium dans le sang (y compris via le tabagisme passif) et une augmentation du risque de mortalité toutes causes confondues.

Cependant, du fait du très grand nombre de composés toxiques présents dans le tabac (plus de 5 000 substances), il est difficile de faire le lien individuel entre une substance donnée et les conséquences du tabagisme, ainsi que d'estimer la part imputable au cadmium dans le fardeau sanitaire du tabac.

D'autres produits à fumer sont susceptibles de contribuer à l'exposition au cadmium. Depuis la jurisprudence « Kannavape » de la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) en 2020³¹, l'interdiction en France de la commercialisation du cannabidiol (CBD) a été jugée illégale. De ce fait, la réglementation a été adaptée et des produits à base de chanvre sont aujourd'hui présents sur le marché. Selon une récente enquête, ils seraient consommés par environ 10% de la population adulte française (Barré et al., 2024). Or, le chanvre est également connu pour être une plante fortement accumulatrice de cadmium (Ali et al., 2019). Faute de données relatives à l'exposition de la population, le chanvre n'a pas été retenu comme source dans cette expertise.

Compte tenu de la prévalence du tabagisme en France, de la capacité du tabac à concentrer naturellement le cadmium dans ses feuilles, ainsi que du niveau élevé d'imprégnation observé chez les fumeurs, le tabac constitue une source pertinente de cadmium à prendre en compte dans le cadre de la présente expertise.

Comparativement au tabac à fumer, l'exposition au cadmium par les produits de vapotage paraît moindre, mais celle-ci reste difficile à caractériser, faute de données. Bien qu'elle puisse constituer une source d'exposition supplémentaire de l'Homme au cadmium, les informations disponibles au niveau français ne permettent pas de prendre en considération cette source par les produits de vapotage dans la présente expertise.

4.5 Les produits cosmétiques

Un produit cosmétique est défini comme une « substance ou un mélange destiné à être mis en contact avec les parties superficielles du corps humain (l'épiderme, les systèmes pileux et capillaire, les ongles, les lèvres et les organes génitaux externes) ou avec les dents et les muqueuses buccales, en vue, exclusivement ou principalement, de les nettoyer, de les parfumer, d'en modifier l'aspect, de les protéger, de les maintenir en bon état ou de corriger les odeurs corporelles » (Article L5131-1, code de la santé publique).

Les produits cosmétiques sont régis, dans l'Union européenne, par le règlement (CE) n°1223/2009 du 30 novembre 2009 relatif aux produits cosmétiques, applicable depuis le 11 juillet 2013. Le cadmium et ses composés font partie des substances listées en annexe II de ce règlement ; leur utilisation dans la formulation des produits cosmétiques présents sur le marché européen est donc interdite. Cependant, le cadmium et ses composés peuvent être retrouvés dans les produits cosmétiques en tant que contaminants, notamment dans des produits contenant des pigments tels que les rouges à lèvres, les fonds de teint ou encore les fards à paupières (Gyamfi et al., 2024 ; Lara-Torres et al., 2021 ; Navarro-Tapia et al., 2021). Comme indiqué dans le règlement européen, « la présence non intentionnelle d'une petite quantité d'une substance interdite, provenant d'impuretés issues d'ingrédients naturels ou

³¹ https://bdoc.ofdt.fr/index.php?lvl=notice_display&id=84113

synthétiques, du processus de fabrication, du stockage, de la migration de l'emballage, qui est techniquement inévitable dans de bonnes pratiques de fabrication, est permise à condition qu'elle soit conforme à l'article 3 [sur la sécurité des produits cosmétiques pour la santé humaine] ».

Compte tenu de données issues de la littérature³², les produits cosmétiques constituent une source de cadmium supplémentaire prise en compte dans la présente expertise.

4.6 Autres sources potentielles

Les matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA) ont été identifiés par le GT comme une autre source potentielle de cadmium pour l'Homme.

Le domaine des MCDA est très large en termes de typologies et d'usages (les emballages destinés à contenir, protéger et conserver l'aliment ; les ustensiles employés pour la transformation de l'aliment, les matériaux et objets actifs destinés à préserver activement ou améliorer l'état de l'aliment et les matériaux dits d'« usine »).

Au niveau réglementaire, les exigences générales, applicables aux matériaux et objets destinés à entrer au contact des aliments sont régies par un règlement cadre, Règlement (CE) n°1935/2004³³. Les exigences dudit règlement, dont le principe d'inertie tel que décrit par son article 3, s'appliquent aux 17 catégories de matériaux et objets listés (colles, céramiques, liège, caoutchoucs, verre, résines échangeuses d'ions, métaux et alliages, papier et carton, matières plastiques, encres d'imprimerie, celluloses régénérées, silicones, textiles, vernis et revêtements, cires, bois). Ce contrat d'objectif est décliné en contrat de moyen *via* des mesures spécifiques européennes, directives ou règlements, pour certains de ces types de matériaux dont matériaux plastiques, céramiques, etc...

En l'absence de réglementation européenne spécifique à un domaine, le droit national des états membres s'applique en cohérence avec le principe de reconnaissance mutuelle. Toutes ces mesures spécifiques, européennes ou nationales, peuvent comporter des critères de puretés applicables à certaines substances au stade du matériau ou de l'objet fini, telles que des restrictions relatives à la composition du matériau ou des limites de migration spécifiques.

Au niveau français pour des matériaux non couverts par des législations européennes harmonisées spécifiques tels que les métaux et alliages, les caoutchoucs ou les élastomères silicone, la DGCCRF élabore ainsi des fiches précisant les critères et modalités de vérification de l'aptitude au contact alimentaire de ces matériaux, qu'elle publie sur son site.

Concernant le cadmium, divers matériaux sont concernés par des restrictions spécifiques à chacun tels que les métaux et alliages, les matériaux inorganiques (verre, cristal céramique, vitrocéramique et objets émaillés) ou encore les matériaux plastiques.

A titre d'exemple, les limites spécifiques de migration en cadmium dans les céramiques et céramiques émaillées ou décorées sont fixées par la réglementation (Directive 84/500/CEE amendée par la directive 2005/31/CE) et sont définies par catégorie (selon des critères de forme, de taille ou de fonction), comme suit dans le **Tableau 1**.

³² Données collectées et organisées en base de données dans le cadre de PARC

³³ Règlement (CE) No 1935/2004 concernant les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires abrogeant les directives 80/590/CEE et 89/109/CEE

Tableau 1. Limites spécifiques de migration en cadmium pour les céramiques et céramiques émaillées ou décorées destinés au contact alimentaire, fixées par la réglementation (Directive 84/500/CEE, arrêté du 7 novembre 1985, DGCCRF 2016)

Catégories	Limites
Catégorie 1 : objets non remplissables et objets remplissables, dont la profondeur interne, mesurée entre le point le plus bas et le plan horizontal passant par le bord supérieur, est inférieure ou égale à 25 mm.	0,07 mg.dm ⁻²
Catégorie 2 : objets remplissables autres que ceux visés par les catégories 1 et 3.	0,3 mg.L ⁻¹
Catégorie 3 : ustensiles de cuisson ; emballages et récipients de stockage ayant une capacité supérieure à 3 litres.	0,1 mg.L ⁻¹

Ces mêmes restrictions s'appliquent aux « Verre - cristal - vitro céramique - objets émaillés (autres que céramiques) », avec pour le contact buccal une limite de migration pour le cadmium de 0,2 mg/article (concerne tout objet décoré extérieurement sur 20 mm de hauteur, mesurée à partir du bord supérieur) (DGCCRF, 2016a).

Pour les MCDA métalliques, le cadmium est limité en tant qu'élément indésirable avec une teneur maximale acceptable dans le métal ($\leq 0,01$ % en masse) et une limite de migration spécifique à l'aliment qui ne doit pas dépasser 0,005 mg.kg d'aliment⁻¹ dans les conditions d'usage.

Pour les MCDA en plastique, si le cadmium n'est pas autorisé en tant qu'usage intentionnel dans la formulation d'un matériau plastique au sens du règlement 10/2011/EC et amendements en vigueur, il est réglementé en tant que recherche d'élément trace métallique avec une limite de migration spécifique de 0,002 mg.kg⁻¹ d'aliment.

Les sources des éléments traces métalliques, dont le cadmium, dans ces MCDA, peuvent être les impuretés présentes dans les matières premières utilisées dans la fabrication des matériaux, une contamination croisée par des éléments traces métalliques *via* les procédés de fabrication, voire les conditions environnementales, pendant la production ou le stockage des matériaux.

Les principales catégories de MCDA ayant été identifiées comme sources potentielles de cadmium sont les métaux et alliages et les matériaux inorganiques, notamment les céramiques et objets émaillés.

En effet, diverses études font état de migration possible du cadmium à partir de vaisselle en céramique et des émaux vers l'aliment, pouvant être accentuée par l'effet de la température, la durée d'utilisation ou de l'acidité de l'aliment (Rebeniak et al. ; 2014 , Eissa et al., 2023). De manière générale, ces études se réfèrent à des repères réglementaires pour statuer sur la conformité de l'utilisation des MCDA. Ainsi, les limites de migration permises par la législation européenne sont rarement dépassées et lorsqu'elles le sont, elles concernent principalement des articles importés hors de l'Union européenne. Il est rapporté notamment que 23,4 % des

notifications RASFF³⁴ étaient relatives à 6 métaux dont le cadmium dans les MCDA entre 2000 et 2022, reportées sur l'ensemble des notifications (denrées alimentaires, denrées animales et MCDA). 14,8 % d'entre elles concernent le cadmium. Plus spécifiquement, de 2019 à 2022, les notifications relatives au cadmium dans les MCDA variaient de 1,1 à 1,7 % (majoritairement sur des articles originaires de Chine) (Rebeniak et al., 2014 ; Eissa et al. 2023).

Néanmoins, selon Rebeniak et al. (2014), la contribution de l'exposition du consommateur au cadmium issu de ces vaisselles s'ajoutant aux autres sources d'exposition peut conduire à des dépassements de la valeur toxicologique de référence (Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de $2,5 \mu\text{g.kg}^{-1} \text{ pc. sem}^{-1}$ de l'Efsa (2012)), notamment pour la population infantile. Ce constat est aussi souligné dans le rapport du BfR 2020³⁵ sur la vaisselle en céramique. Les recommandations émises par le BfR stipulent que les limites spécifiées dans la directive 84/500/CEE concernant les objets en céramiques destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires devraient être abaissées afin d'assurer la sécurité du consommateur, notamment compte tenu de l'apport en cadmium provenant d'autres sources (Bundesinstitut Für Risikobewertung, 2020).

Le BfR indique que chez certains groupes de population (végétariens, enfants, fumeurs), l'exposition au cadmium peut atteindre ou dépasser la Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de $2,5 \mu\text{g.kg}^{-1} \text{ pc sem}^{-1}$ (BfR, 2009, Efsa, 2012) et que les limites de migration en cadmium des céramiques, définies par la directive 84/500/CEE n'ont pas été établies sur la base de données toxicologiques et d'une évaluation du risque, mais sur les données « anciennes » concernant les données de migration qui étaient disponibles lors de l'élaboration de la législation. Compte tenu de l'évolution des connaissances et de l'amélioration des performances des technologies analytiques, notamment en termes de limite de détection et de méthodologie (de migration), il recommande que ces limites soient adaptées en fonction des connaissances actuelles, de même que les conditions d'essai devraient être révisées afin qu'elles soient plus représentatives de l'utilisation réelle des articles en céramique (durée de contact, chauffage, micro-ondes, utilisation sur une longue durée). Ces articles ne devraient pas contribuer davantage à l'exposition de la population au cadmium et au dépassement de la DHT. C'est pourquoi le BfR a calculé les quantités de cadmium et d'autres métaux pouvant migrer sans risque pour la santé, qu'il qualifie de « rejets acceptables liés à la surface ». Pour calculer ces valeurs, il s'appuie sur les études toxicologiques disponibles d'une part, et tient compte des dernières technologies en matière de limites de détection, d'autre part. Ainsi, les limites de migration acceptables, calculées par le BfR sont jusqu'à 70 fois inférieures aux limites actuellement en vigueur définies par la directive 84/500/CEE.

En France, seules des données relatives aux plans annuels de contrôle des MCDA par la DGCCRF ont pu être recueillies. Les données sur 5 ans (2018-2022) ont permis d'identifier peu de dépassements des critères réglementaires concernant le cadmium (2 à 3,4 % sur les matériaux inorganiques incluant les céramiques et émaux (sur 28 à 50 prélèvements/an réalisés). Il est noté le dépassement occasionnel de la limite de migration de $0,005 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'aliment fixée au niveau national pour la catégorie « métaux et alliages ». Ainsi en 2019, sur 28 articles métalliques prélevés, une tasse en étain française présentait une teneur en

³⁴ *Rapid Alert System for Food and Feed* : Système d'alerte qui signale les problèmes relatifs aux produits agroalimentaires dans l'Union européenne

³⁵ Ceramic crockery: BfR recommends lower release of lead and cadmium

cadmium dépassant 82 fois la valeur de libération spécifique ; de même, 8 lots d'ustensiles de cuisine en aluminium (marmite, poêles, louches prélevés à Mayotte et en provenance de Madagascar) dépassaient de 100 fois la valeur seuil. Plus spécifiquement, dans son enquête de 2019 sur les objets en céramique, verre ou ardoise concernant les importateurs, les fabricants, les transformateurs et la distribution, un seul dépassement sur 29 articles, de la limite de migration concernant le cadmium a été identifié sur un lot de 2 assiettes en porcelaine fabriquées au Japon (représentant 3,4 % de non-conformités des articles en matériaux inorganiques).

En 2025, à partir de données de surveillance de différents matériaux entrant en contact des denrées alimentaires, le BfR (2025) a réévalué l'exposition par cette source à 21 métaux lourds dont le cadmium. Le BfR a publié les résultats de migration de cadmium à partir de 173 objets métalliques, non revêtus et émaillés. Seuls 3 échantillons ont présenté une concentration supérieure à la limite proposée par le Conseil de l'Europe (2024) de 0.005 mg kg^{-1} , s'agissant uniquement d'objets émaillés. Les expositions estimées ne dépassent pas la valeur toxicologique de référence par ingestion pour le cadmium. La contribution seule par les MCDA pour le cadmium à l'exposition semble faible.

Ainsi, en France, au regard des résultats des contrôles réalisés, la contribution seule des MCDA à l'exposition du consommateur apparaît comme faible. Bien qu'elle puisse constituer une source d'exposition supplémentaire de l'Homme au cadmium, les informations disponibles au niveau français ne permettent pas de la prendre en considération cette source dans la présente expertise.

4.7 Approche intégrée des sources et voies d'exposition humaine au cadmium

4.7.1 Vue d'ensemble des sources et voies d'exposition humaine au cadmium

Dans la perspective d'évaluer des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium et d'analyser différentes options d'action, il apparaît utile de faire un état des lieux des publications dressant une vision globale des principales sources et voies d'exposition humaine au cadmium. Une recherche étendue de la littérature relative aux différentes sources et voies d'exposition humaine au cadmium a été conduite sur la période 2010 - 2024, aux niveaux national et international.

Au niveau national, Caudeville et al. (2012) ont développé une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques incluant le cadmium, puis construit des indicateurs spatialisés en vue d'identifier les inégalités environnementales à l'échelle régionale (résultats sur la région Hauts de France). Plus récemment, Carne et al. (2021) ont étudié l'exposition alimentaire au cadmium en lien avec les sources de cadmium dans les sols et plus spécifiquement liées aux engrais minéraux phosphatés, identifiés dans ces travaux comme une source majeure d'apport en cadmium dans les sols agricoles français.

Au niveau international, l'article de revue de Clemens et al. (2013) visualise les sources d'exposition au cadmium dans l'environnement pour la population générale non fumeuse. Ces

auteurs observent que les activités industrielles (par exemple, la fabrication de métaux non ferreux, la production d'énergie et l'exploitation minière) font partie des principales sources de rejet de cadmium dans l'air, l'eau et le sol. Outre les dépôts atmosphériques, les auteurs soulignent que l'application d'engrais minéraux phosphatés, d'effluents d'élevage et de boues d'épuration contribue de façon importante à l'accumulation de cadmium dans les sols agricoles et, indirectement, dans les milieux aquatiques. Les auteurs notent aussi, pour les fumeurs, que l'inhalation du cadmium accumulé dans les feuilles de tabac représente une source majeure d'exposition. Même si la revue de Clemens et al. (2013) se concentre plutôt sur l'accumulation du cadmium dans les plantes et l'exposition humaine qui en résulte, elle a l'intérêt de poser la problématique de façon plus globale, citant notamment la contamination de l'air et de l'eau par les activités industrielles. Les auteurs montrent aussi la part importante des activités agricoles par le fait qu'il s'agirait de la principale voie de contamination de l'Homme en dehors du tabagisme, notamment par la consommation de céréales, de légumes et de tubercules.

Au niveau européen, Rietra et al. (2017) font un état des lieux du cadmium dans la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis ses sources, son transfert dans les productions agricoles et les denrées alimentaires et l'exposition humaine au cadmium. Les auteurs soulignent le lien entre le cadmium présent dans les sols, la contamination des productions agricoles et l'exposition humaine au cadmium par voie alimentaire : ils exposent ainsi la pertinence d'évaluer cette relation. Cet article relève la variabilité régionale (au niveau d'un pays et au niveau européen) des teneurs en cadmium dans les sols. Ces observations convergent avec les constatations plus récentes de la *Food and Drug Administration*, publiées dans l'article de Schaefer et al. 2020. Les auteurs exposent les voies d'entrée et de circulation du cadmium dans la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis la présence naturelle de cet élément dans l'environnement jusqu'aux techniques de préparation des aliments, en passant par plusieurs sources de contamination liées à diverses activités agricoles et agroalimentaires. Ils présentent notamment une diversité de facteurs influençant la concentration en cadmium dans les plantes cultivées (caractéristiques du sol, propriétés génétiques des plantes, teneur en cadmium dans le sol, pratiques de fertilisation et d'irrigation). Cet article questionne aussi les stratégies de réduction de l'exposition de la population au cadmium à différentes étapes de la chaîne de production des denrées alimentaires (cf. chapitre 6).

Enfin, pour rappel, le cadmium a été identifié comme un des cas d'étude dans le cadre du Projet 6.2.1.a « Modélisation source-to-dose » et du Projet 6.2.1.b « Évaluation de l'exposition agrégée intégrant l'environnement général et professionnel » du PARC (PARC, 2023, *additional deliverable* AD6.3, <https://www.eu-parc.eu/deliverables>).

Ces travaux illustrent le caractère multifactoriel de l'exposition de la population générale au cadmium et l'intérêt d'étudier cette exposition en France en agrégeant la diversité des sources et voies impliquées.

4.7.2 Schéma conceptuel du GT relatif aux sources et voies d'exposition humaine au cadmium en soutien à l'expertise

Au regard des sources et voies d'exposition retenues par le GT pour cette expertise et notamment en vue de caractériser l'exposition agrégée de la population, un schéma

conceptuel listant l'ensemble des sources et voies d'exposition humaine au cadmium en lien avec le périmètre de la saisine a été élaboré.

Le schéma conceptuel en Figure 11 donne une visualisation des sources et voies d'exposition de la population générale au cadmium retenues pour la suite de l'expertise.

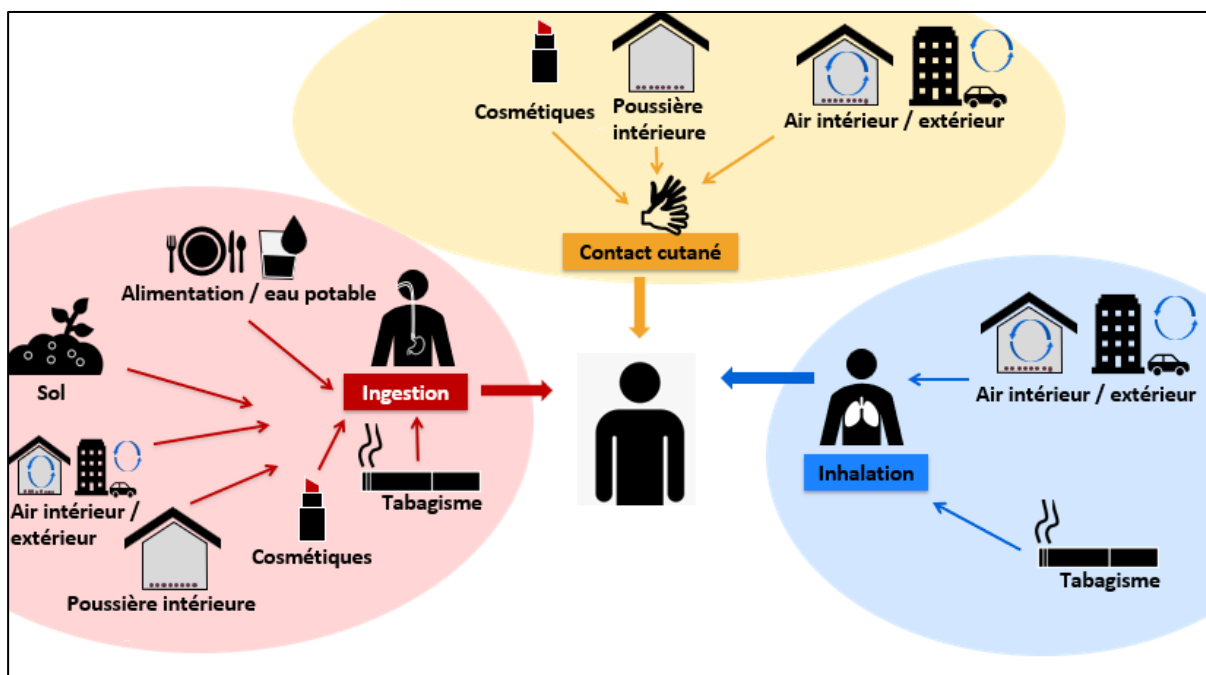


Figure 11. Schéma conceptuel relatif aux sources et voies d'exposition humaine au cadmium retenues pour la suite de l'expertise

5 Identification des sources contributrices, situations à risque et déterminants de l'exposition au cadmium dans la population générale française sur la base d'une approche d'exposition agrégée

5.1 Démarche générale

La démarche générale s'appuie sur plusieurs étapes illustrées dans la **Figure 12**.

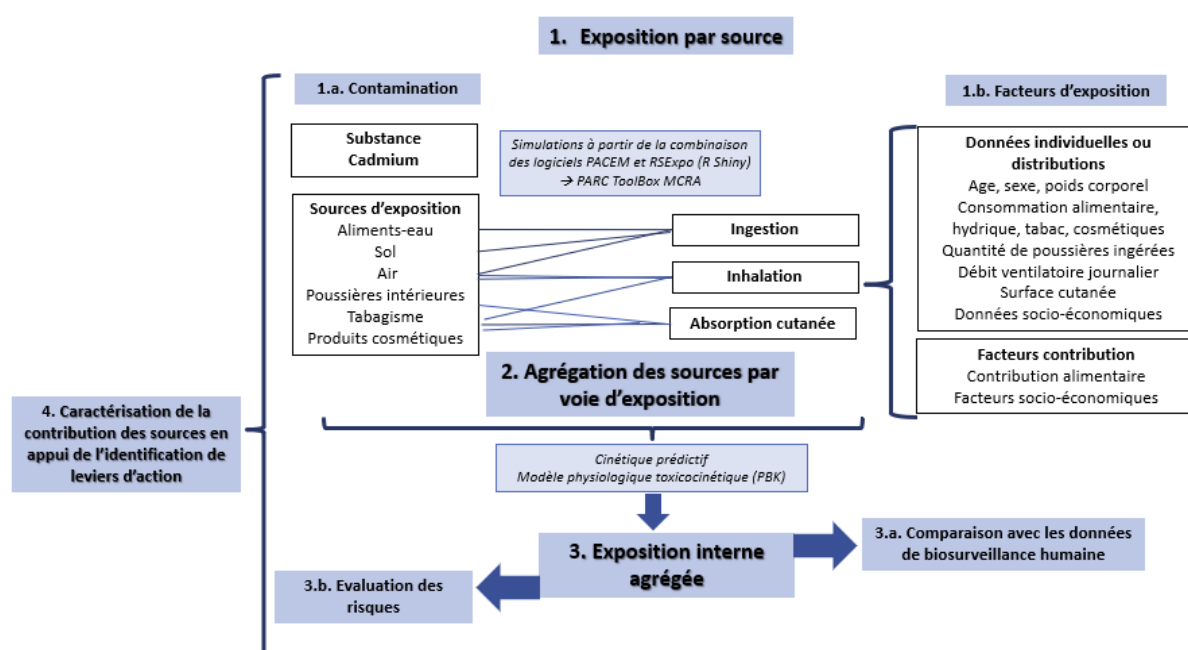


Figure 12. Schéma conceptuel de l'agrégation des sources et voies d'exposition au cadmium, de la prédiction du cadmium urinaire et de l'évaluation de la contribution des sources à l'imprégnation pour la population générale adulte et enfant.

Dans une première étape, en s'appuyant sur les éléments contextuels exposés dans le chapitre 3, la revue de la littérature conduite dans le chapitre 4 et la collecte de données d'entrée présentées dans ce chapitre, différentes sources d'exposition ont été identifiées et considérées comme pertinentes pour évaluer l'exposition agrégée au cadmium. Les sources identifiées sont l'alimentation, l'eau de boisson, les sols, l'air, les poussières sédimentées en milieu intérieur, le tabagisme et les produits cosmétiques. Les populations d'intérêt sont la population générale, adultes et enfants (**Figure 12**, étape 1a). Les facteurs d'exposition correspondants, tels que la consommation d'aliments ou la quantité de poussières ingérées, l'âge, le sexe, le poids corporel et les données socio-économiques, ont été pris en compte (**Figure 12**, étape 1b). Dans une deuxième étape, les sources par voies d'exposition individuelle ont été agrégées en tenant compte des facteurs d'exposition (**Figure 12**, étape 2). Dans une troisième étape, les concentrations urinaires du cadmium (cadmiurie) ont été simulées à partir des expositions externes pour chaque couple source-voie, agrégées dans un modèle

toxicocinétique physiologique (PBK) permettant de tenir compte de l'évolution au cours de la vie de l'exposition des individus et de leurs caractéristiques physiologiques (**Figure 12**, étape 3). Les cadmiuries ainsi simulées ont ensuite été comparées à celles mesurées dans le cadre de l'étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition, Esteban comme présenté dans l'encadré 1 (Oleko et al., 2021) (**Figure 12**, étape 3a). Puis, les cadmiuries ont été comparées avec les valeurs sanitaires de référence du cadmium (Anses, 2019a) (**Figure 12**, étape 3b). Dans une quatrième étape, la contribution des différentes sources de cadmium à l'exposition interne a été évaluée afin de déterminer les leviers d'action majeurs permettant de réduire l'imprégnation humaine au cadmium (**Figure 12**, étape 4).

Encadré 1 : Concentration en cadmium dans les urines (cadmiuries)

Les cadmiuries ont été mesurées dans l'étude Esteban (2014-2016) conduite par Santé publique France auprès de la population générale des adultes (18 à 74 ans) et des enfants (6 à 17 ans) (Oleko et al., 2021). Le cadmium urinaire est un bon indicateur de la charge corporelle et de la quantité accumulée de cadmium dans les reins. Les concentrations en cadmium dans l'urine reflètent l'exposition cumulative.

Dans l'étude Esteban, le dosage du cadmium dans les urines a été réalisé sur 1 052 enfants et 2 419 adultes ayant réalisé un examen de santé, après recueil des urines du matin. Le cadmium a été quantifié dans 100 % des échantillons aussi bien chez les enfants que chez les adultes.

La moyenne géométrique de la concentration en cadmium dans la population adulte de 18 à 74 ans est de $0,57 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine. Chez les hommes, celle-ci est de $0,47 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine et chez les femmes de $0,68 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine.

Chez les enfants, la moyenne géométrique de la concentration est de $0,27 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine.

Pour les fumeurs, la moyenne géométrique est de $0,65 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine, tandis qu'elle est de $0,64 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine pour les ex-fumeurs et de $0,50 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine pour les non-fumeurs (exposés ou non au tabagisme passif).

L'objectif était d'estimer les expositions agrégées et les imprégnations d'une population cible représentative de la population française en 2025. Il a été acté par les experts du GT de s'appuyer sur la population Esteban au regard des connaissances disponibles (données socio-démographiques et imprégnation notamment). Toutefois, l'étude Esteban datant de 2014, il a été nécessaire de modéliser les expositions et les imprégnations dans un premier temps, pour cette population de 2014, avant de pouvoir déterminer celles de la population de 2025. La présentation des données et équations des parties suivantes tiennent compte de cela.

Le présent chapitre est structuré de la façon suivante :

- La section 5.2 décrit l'approche méthodologique. Cette section détaille les données d'entrée et les équations utilisées pour estimer les expositions par source et voie. Puis, elle présente la méthode permettant d'agréger les expositions et de simuler les cadmiuries chez des individus d'une population en 2014 et celle de 2025 structurée sur la base de la population Esteban. Cette section se termine par la présentation de la démarche méthodologique visant à analyser les déterminants de l'exposition, l'identification de la proportion de la population à risque et la contribution des sources et voies à la cadmiurie.

- La section 5.3 présente les résultats de l'analyse des déterminants socio-démographiques de l'exposition humaine au cadmium. Les résultats des cadmiuries simulées pour la population cible en 2014, leur comparaison avec celles mesurées dans l'étude Esteban (Oleko et al., 2021), et la contribution des différentes sources par différentes voies pour la population cible en 2025 sont discutés. Ces résultats permettront d'orienter les options d'action à cibler (cf. chapitres 6 et 7).
- La section 5.4 conclut sur les éléments clés résultant de l'évaluation multi-sources, multi-voies de l'exposition humaine au cadmium et de la compréhension de la situation sanitaire en vue de l'identification de leviers d'action.

5.2 Approche méthodologique

5.2.1 Exposition au cadmium relative à différentes sources par différentes voies

En lien avec la **Figure 11**, la **Figure 13** associe les données retenues par source et voie d'exposition pour agréger les expositions. Les données de concentration selon la source, les facteurs d'exposition et les équations utilisées pour agréger les expositions sont détaillées ci-après et synthétisées dans le **Tableau 3**.

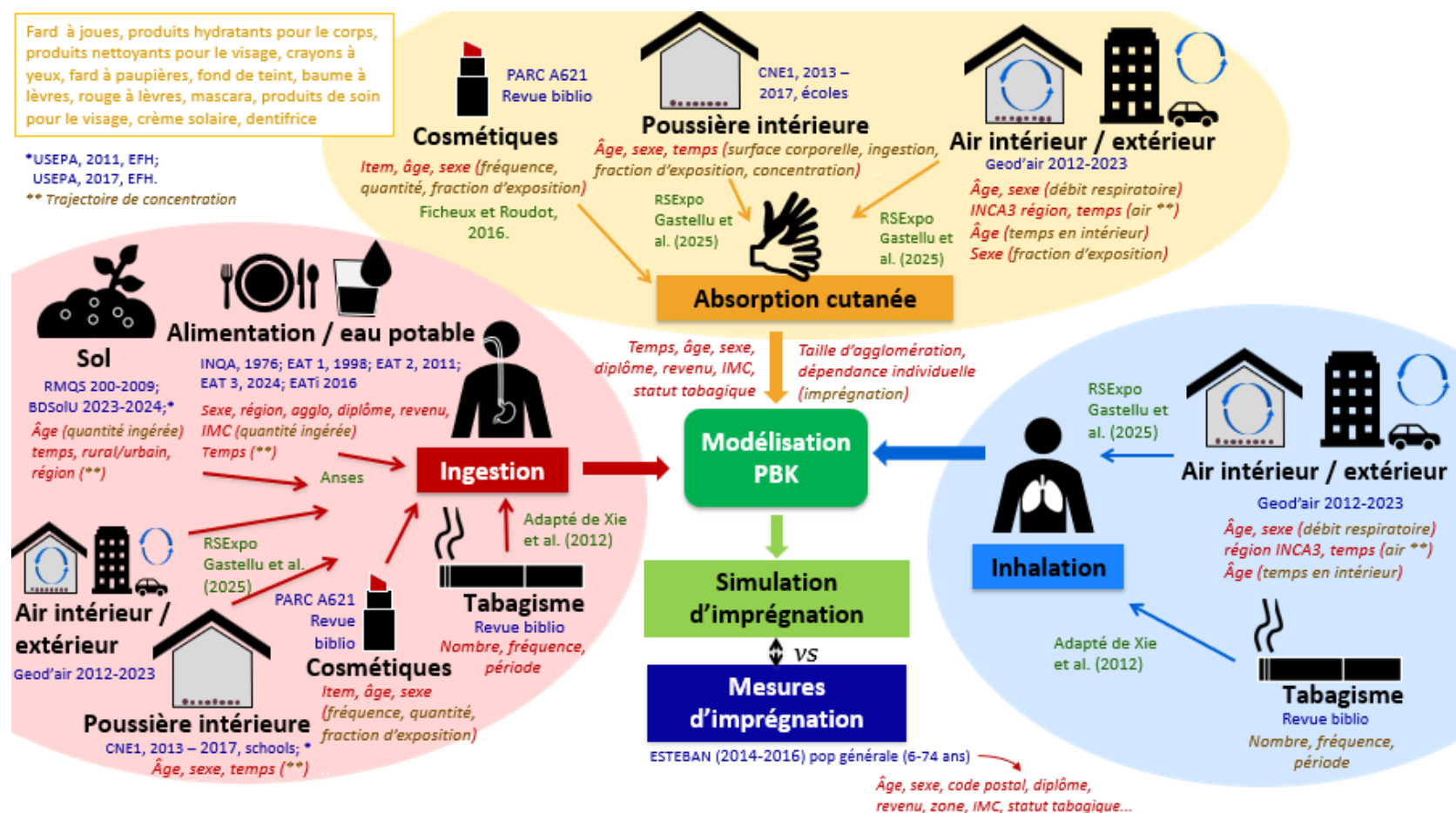


Figure 13. Variables, sources de données et modèles retenus pour estimer et agréger les sources et voies d'exposition liées au cadmium pour la population générale française des adultes (≥ 18 ans) et des enfants (0-17 ans). La couleur de la police correspond : rouge : variable de stratification ; doré : facteur d'exposition ; bleu : sources de données ; vert : modèle d'exposition.

5.2.1.1 Sources des données de concentrations en cadmium

5.2.1.1.1 Aliments

Bien que le cadmium soit mesuré dans les denrées alimentaires dans le cadre des plans de surveillance et de contrôle, n'ont été considérées que les données issues des Études de l'Alimentation Totale (EAT) conduites en France dans la mesure où les aliments sont analysés "tels que consommés", c'est-à-dire lavés, épluchés et cuits le cas échéant. Cette approche présente l'avantage de fournir des données d'exposition chronique pour la population générale plus réalistes que les approches fondées à partir des données issues des programmes de surveillance et de contrôle pour lesquelles les analyses sont réalisées sur des denrées brutes.

Pour retracer l'évolution des expositions alimentaires au cadmium, les données mobilisées proviennent de l'Inventaire national de la qualité alimentaire (INQA, 1978), des différentes EAT françaises (EAT1, EAT2, EATi) et de l'EAT3 actuellement en cours, tel que présenté dans le **Tableau 2**. Les résultats relatifs au cadmium issus de ces études ont été intégrés aux travaux de modélisation afin de prendre en compte la dimension temporelle de l'exposition alimentaire.

A noter qu'historiquement, l'INQA a constitué la première évaluation nationale des apports alimentaires en contaminants. Par la suite, les EAT introduites en France successivement ont progressivement élargi le spectre des substances étudiées et des populations couvertes, jusqu'à inclure les enfants en bas âge (EATi) et, plus récemment, les aliments issus de l'agriculture biologique (EAT3). Dans cette dernière étude, le cadmium a été détecté dans 89 % des échantillons analysés.

Tableau 2. Sources de données mobilisées pour les expositions alimentaires

Sources	Chiffres-clés	Institution responsable
INQA (1978)	46 substances – 354 aliments	Ministère de l'Environnement
EAT 1 (2004)	24 substances inorganiques, mycotoxines - - 5 400 aliments « tels que consommés » – 1080 échantillons composites (de 5 sous- échantillons maximum)	INRA, Afssa
EAT 2 (2010)	445 substances – 19 785 aliments « tels que consommés » - 1319 échantillons composites (de 15 sous-échantillons)	Afssa-Anses
EATi (2016)	670 substances – 5 484 aliments « tels que consommés » – 457 échantillons composites (de 12 sous-échantillons)	Anses
EAT 3	280 substances – 8 628 aliments « tels que consommés » - 719 échantillons composites (de 12 sous-échantillons)	Anses

5.2.1.1.2 Sols

Les données proviennent du réseau français de mesures de la qualité des sols (RMQS)³⁶, outil de surveillance des sols à long terme. Il s'appuie sur des mesures et l'observation de 2240 sites couvrant toute la France métropolitaine, implantés sur des parcelles

³⁶ Réseau de Mesures de la Qualité des Sols – RMQS : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>

géoréférencées et régulièrement réparties, selon une maille carrée (16 km × 16 km) (Arrouays et al. 2002 ; Arrouays et al. 2020). Ce réseau est représentatif du territoire français, couvrant un large spectre de conditions climatiques, pédologiques et d'utilisation des terres (cultures, prairies permanentes, forêts, vergers et vignobles, terres agricoles, etc). Tous les 15 ans, sur chaque site, des échantillons de sol sont prélevés, des mesures sont effectuées puis analysées. Sur ces sites, la teneur en carbone organique du sol (SOC), la distribution granulométrique, le pH, les principaux éléments traces totaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Tl, Zn) et les densités de sol sont déterminés pour les couches 0-30 et 30-50 cm. La première campagne de prélèvement en métropole s'est déroulée de 2000 à 2009.

Pour les modélisations conduites dans le cadre du GT, les données de mesure pour les couches 0-30 cm du sol pour le cadmium résultant de la campagne couvrant la période 2000-2009 ont été considérées comme données d'entrée.

Afin de tenir compte de l'environnement urbain, les concentrations issues de la base de données des analyses de sols urbains (BDSolU <https://www.bdsolu.fr/fr>) ont également été intégrées au modèle. La base de données BDSolU, développée par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) dans le cadre de conventions de recherche avec l'ADEME, contient des analyses chimiques de sols prélevés en milieu urbain. Les données couvrant la période 2023-2024 et concernant la couche 0-30 cm ont été retenues.

La contamination des sols en cadmium a évolué au cours du XX^{ème} siècle. Cette évolution a été modélisée par Zhong et al. (2024) sur la couche 0-20 cm, puis par Gastellu et al., (2025) dans leurs travaux et pourra donc être considérée pour étudier l'évolution de l'exposition au cours de la vie.

5.2.1.1.3 Air extérieur et intérieur

L'évolution temporelle des concentrations en cadmium dans les particules atmosphériques de taille PM₁₀ a été modélisée à partir de la base de données nationale de la qualité de l'air³⁷ (Geod'air, <https://www.geodair.fr/>) et de données relatives à ces contaminants mesurés dans les mousses, comme présenté dans Gastellu et al., (2025).

Geod'air est une base de données nationale de la qualité de l'air, gérée et mise en œuvre par l'INERIS au titre du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). Geod'air fournit les données et statistiques de référence sur la qualité de l'air en France, sur la base de données sources issues du dispositif de surveillance opéré dans chaque région par les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Les premières données datent de 2013.

Du fait de l'absence de données publiées pour l'air intérieur, les concentrations dans l'air extérieur ont été utilisées pour ce compartiment.

5.2.1.1.4 Poussières intérieures sédimentées

Les concentrations en cadmium dans les poussières intérieures sédimentées rapportées dans la Campagne Nationale Ecoles 1 (CNE1) de 2013-2017 ont été utilisées pour cette période (Dassonville et al., 2019). L'évolution temporelle a été estimée en calant la référence sur l'évolution des particules PM₁₀ atmosphériques, selon la démarche présentée dans Gastellu et al. (2025).

³⁷ <https://www.geodair.fr/>

5.2.1.1.5 *Produits du tabac*

Des données quantitatives sur les concentrations et la prévalence en cadmium dans les produits de tabac disponibles sur les marchés européens ont été recueillies à la suite d'une revue bibliographique menée dans le cadre du programme de recherche PARC sur la période 2013-2024. Divers rapports nationaux et internationaux ont été consultés, ainsi que des articles scientifiques, des rapports institutionnels et des bases de données. Une collecte de références a également été effectuée, notamment auprès de l'unité *Evaluation des produits du tabac et produits connexes* (UETPC) de l'Anses qui a fourni des données issues d'une précédente revue bibliographique. Au total, 37 références ont été retenues.

5.2.1.1.6 *Produits cosmétiques*

Des données quantitatives sur les concentrations et la prévalence en cadmium dans les produits cosmétiques disponibles sur les marchés européens ont été recueillies à la suite d'une revue bibliographique menée dans le cadre du programme de recherche PARC, sur la période de 2013 à 2024. Divers rapports nationaux et internationaux ont été consultés, ainsi que des articles scientifiques, des rapports institutionnels et des bases de données. Des documents précédemment identifiés comme pertinents ont été également inclus dans l'analyse bibliographique. Au total, 108 références ont été retenues. A partir de ces références, les produits pour lesquels il est possible d'estimer la prévalence de contamination et les concentrations, ont été sélectionnés : fards à joues, produits hydratants pour le corps, produits nettoyants pour le visage, crayons à yeux, fard à paupières, fonds de teint, baumes à lèvres, rouge à lèvres, mascara, produits de soin pour le visage, crèmes solaires, dentifrices.

5.2.1.2 Facteurs d'exposition

Les sections suivantes présentent les différents paramètres nécessaires à l'évaluation de l'exposition au cadmium pour les différentes sources et voies d'exposition (quantité consommée, coefficients de transfert, etc.). Une synthèse est présentée dans le **Tableau 3**.

5.2.1.2.1 *Quantité d'aliments consommés*

Les études individuelles nationales des consommations alimentaires (INCA) réalisées en France tous les 7 ans par l'Anses donnent une photographie des habitudes de consommations alimentaires de la population française métropolitaine.

Trois études INCA ont été conduites : INCA1 (1998-1999), INCA2 (2006-2007) pour des individus de plus de 3 ans et INCA3 (2014-2015) incluant des individus 0-17 ans et 18-79 ans, et mobilisées dans les calculs d'exposition alimentaires de ce travail.

L'étude BEBE-SFAE 2005 (Fantino et Gourmet, 2008) a également été utilisée pour les enfants de moins de 3 ans.

5.2.1.2.2 *Coefficient de transfert du cadmium de l'aliment ou de la poussière ingérée à l'épithélium du tractus gastro-intestinal*

Le coefficient de transfert du cadmium de l'aliment et de la poussière ingérée à l'intérieur de la paroi du tube digestif (sans unité) a été modélisé à l'aide d'une distribution triangulaire variant selon le sexe, comme proposé dans Gastellu et al (2025).

5.2.1.2.3 Ingestion de poussière et de sols

Les quantités quotidiennes moyennes de sol et de poussière intérieures sédimentées ingérées par un individu sont issues de l'*Exposure Factors Handbook*, éditions 2011 et 2017 (US EPA 2011, 2017) qui fournit des quantiles. Après l'ajustement et le test de plusieurs types de distributions (lognormale, gamma, etc.), une distribution lognormale par classe d'âge a été choisie.

5.2.1.2.4 Fraction de cadmium dans la poussière pouvant entrer en contact avec la peau

La fraction massique de cadmium dans la poussière disponible pour le contact cutané est issue de Bekö et al. (2013) et vaut 0,15.

5.2.1.2.5 Débit surfacique de poussière adhérent à la peau

Le débit surfacique de poussière adhérent à la peau a été estimé à partir d'une valeur ponctuelle de 0,96 g.m⁻².j⁻¹, issue de Bekö et al. 2013.

5.2.1.2.6 Durée de l'exposition à la poussière à domicile

La durée journalière d'exposition à la poussière domestique est fixée à 24 heure, selon les travaux de Hermant et al. (2018).

5.2.1.2.7 Surface corporelle

La surface corporelle est issue de l'*Exposure Factors Handbook*, édition 2011 (US EPA 2011). Après l'ajustement et le test de plusieurs types de distributions (lognormale tronquée, gamma, normale tronquée, bêta) par classe d'âge et sexe, des distributions lognormale tronquée, gamma, ou normale tronquée ont été sélectionnées pour chaque niveau du couple de variables (classe d'âge, sexe).

5.2.1.2.8 Fraction de la surface corporelle exposée à l'air et à la poussière

La fraction de la surface corporelle exposée à l'air et à la poussière est issue de l'*Exposure Factors Handbook*, édition 2011 (US EPA, 2011) qui propose une valeur ponctuelle par sexe : 0,63 pour les hommes, et 0,67 pour les femmes.

5.2.1.2.9 Vitesse de dépôt des particules en suspension dans l'air sur la surface de la peau

La vitesse de dépôt des particules en suspension dans l'air sur la surface de la peau est issue de Hermant et al. (2018) et vaut 2,15 m h⁻¹.

5.2.1.2.10 Fraction du temps quotidien passé à l'intérieur

La fraction du temps quotidien passé à l'intérieur est issue de l'*Exposure Factors Handbook*, édition 2011 (US EPA, 2011) qui propose des valeurs moyennes par classe d'âge.

5.2.1.2.11 Débit ventilatoire journalier

Le débit ventilatoire journalier a été modélisé selon l'équation suivante : $V_{inh} = F_{br} * (V_{ti} - V_{ds})$, comme proposé dans Gastellu et al. (2025).

Avec F_{br} : fréquence respiratoire (en j⁻¹), V_{ti} : volume courant (en L), et V_{ds} : volume de l'espace mort respiratoire (en L).

5.2.1.2.12 Facteurs d'exposition liés aux produits cosmétiques

Les facteurs d'exposition liés aux produits cosmétiques sont les suivants :

- la fréquence d'usage par produit cosmétique par jour et selon l'âge et le sexe. Les distributions empiriques obtenues à partir des données d'une étude nationale menée entre 2013 et 2016 (Ficheux et Roudot, 2016) ont été utilisées ;
- la quantité de produit cosmétique utilisé par acte de consommation (en g) qui dépend de l'âge et du sexe. Les distributions empiriques issues de la même étude ont été utilisées (Ficheux et Roudot, 2016) ;
- le facteur de rétention (sans unité) qui correspond, pour une voie donnée, au rapport entre la masse de substance dans le produit utilisé et la masse de substance à laquelle le consommateur est réellement exposé. Il s'agit de la fraction massique de substance qui reste sur la peau après contact cutané du produit, ou encore de la fraction massique de substance qui est avalée après usage du produit par voie orale. Des recommandations pour ces données sont disponibles dans le guide utilisateur de PACEM³⁸ Delmaar et al. (2023) et dans Ficheux et Roudot (2016).

A noter que dans l'étude de Ficheux et Roudot (2016), les habitudes de consommation de cosmétiques ont été évaluées par questionnaire en ligne et par pesées en conditions réelles. Plus de 7000 personnes de 0 à 70 ans ont été interrogées sur l'usage de 141 types de produits, dont certains susceptibles de conduire à une ingestion (ex. rouge à lèvres, produits pour enfants). Un sous-échantillon de plus de 1 000 volontaires a permis d'estimer les quantités appliquées. L'échantillon global était construit sur quotas représentatifs de la population française.

Les produits cosmétiques sélectionnés n'étant pas inhalés en condition normale d'utilisation, seules l'ingestion et l'absorption cutanée ont été considérées pour la présente expertise.

5.2.1.2.13 Facteurs d'exposition liés au tabac

Les facteurs d'exposition liés au tabac sont les suivants :

- La pratique ou non du tabagisme, qui est une variable décrite dans la population de référence utilisée dans ces travaux, issue de l'enquête Esteban (Oleko et al, 2021). Une imputation aléatoire a été effectuée quand l'information de tabagisme était manquante.
- Le nombre de cigarettes fumées par jour (sans unité), qui est également une variable décrite dans la population de référence.
- La fréquence de tabagisme actuelle ou passée (en j⁻¹), également décrite au niveau de chaque individu dans l'enquête. En l'absence d'information, une imputation aléatoire basée sur la distribution observée dans l'étude a été utilisée.
- La période de tabagisme actuelle ou passée (en jours datés), également décrite par individu dans l'enquête. En l'absence d'information, une imputation aléatoire basée sur la distribution observée dans l'étude a été utilisée.
- Le volume d'une bouffée (en m³). Une valeur ponctuelle de 5,5x10⁻⁵ m³ a été préconisée par l'unité Evaluation des produits du tabac et produits connexes (UETPC, Anses).
- Le nombre de bouffées par cigarette (sans unité). Une valeur ponctuelle de 14 a été recommandée par l'unité Évaluation des produits du tabac et produits connexes (UETPC, Anses).

³⁸ <https://www.rivm.nl/en/consumer-exposure-to-chemical-substances/exposure-models/pacem>

- Le coefficient de transfert du cadmium de la cigarette vers l'air inhalé (sans unité). Une recherche bibliographique a été effectuée conjointement dans PARC et par le GT. Une distribution uniforme continue entre 0.016 et 0.44 a été retenue.
- Le coefficient de transfert du cadmium de la fumée inhalée vers les alvéoles pulmonaires (sans unité). Une recherche bibliographique a été effectuée conjointement dans PARC et par le GT de la présente expertise. Une distribution uniforme continue entre 0.55 et 1 a été retenue.
- Le coefficient de transfert du cadmium de la fumée inhalée vers le tractus gastro-intestinal (sans unité). La distribution uniforme reportée dans Gastellu et al. (2025) a été utilisée.

5.2.1.3 Estimation des expositions par source et voies

A partir des données décrites dans les paragraphes précédents et les équations présentées dans le **Tableau 3**, les couples source-voie d'exposition suivants ont été modélisés : ingestion d'aliments, ingestion de poussières intérieures sédimentées, exposition du fumeur aux fumées par ingestion, ingestion de cosmétiques, ingestion de sol, ingestion de particules (PM10) de l'air intérieur et extérieur, inhalation d'air, exposition du fumeur aux fumées par inhalation, contact cutané avec les poussières intérieures, contact cutané avec l'air et contact cutané avec les produits cosmétiques.

Les expositions liées à l'alimentation ont été calculées en considérant dans l'équation la concentration moyenne de cadmium dans l'aliment et la quantité quotidienne moyenne de l'aliment, consommée par un individu. Afin de refléter au mieux l'évolution des expositions alimentaires au cadmium au cours du temps, différentes bases de données de la contamination par le cadmium des aliments et de consommation des aliments ont été combinées comme suit :

- Période d'exposition 1943-1987 : INQA (1978) x INCA1 (1998-1999).
- Période d'exposition 1988-2004 : EAT1 (2000-2004) x INCA1 (1998-1999).
- Période d'exposition 2005-2015 : EAT2 (2007-2009) x INCA2 (2006-2007).
- Période d'exposition 2016-2125 : EAT3 (2020-2021) x INCA3 (2014-2015).
- Période d'exposition 1940-2125 : EAT³⁹ (2012-2016) x Bebe SFAE (2005).

En présence de données inférieures aux limites analytiques dans l'alimentation, celles-ci ont été traitées selon l'hypothèse lowerbound (LB) : les données de type « non détecté » sont remplacées par zéro, les données de type « non quantifié » sont remplacées par la valeur de la limite de détection (LD).

Les expositions liées à l'air, la poussière et au sol ont été calculées à l'aide des équations proposées dans Vanacker et al. (2020) et implémentées dans RSEXPo.

Les expositions liées aux produits cosmétiques pour les adultes ont été calculées à partir des équations adaptées de celles proposées dans le logiciel PACEM⁴⁰. Les données, équations, et valeurs utilisées pour estimer l'exposition au cadmium pour la population générale française adulte (≥18 ans) et enfant (0-17 ans) via les sources et voies d'exposition retenues sont présentées dans le **Tableau 3**.

³⁹ EATi : enfants de 0 à 3 ans

⁴⁰ <https://www.pacemweb.nl/>

Tableau 3. Données d'entrées, équations, et valeurs utilisées pour estimer l'exposition au cadmium pour la population générale française adulte (≥18 ans) et enfant (0-17 ans) via les sources et voies d'exposition retenues

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par ingestion d'aliments						
$E_{food-ing}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion d'aliments (en $\mu\text{g}\cdot\text{j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{food-ing} = \sum_{f=1}^F q_f \times c_f \times \tau_{fg}$ * Valeur calculée dans des précédents travaux. * Distribution empirique par sous-population selon les variables de stratification.	Temps, âge, diplôme, sexe, taille d'agglomération, région, IMC, etc. Toutes les variables des enquêtes de consommation.	Temps, âge, diplôme, sexe, taille d'agglomération, région, IMC.	* Les couplages suivants ont été utilisés : 1943-1987 : INQA (1978) x INCA1 (1998-1999). 1988-2004 : EAT1 (2000-2004) x INCA1 (1998-1999). 2005-2015 : EAT2 (2007-2009) x INCA2 (2006-2007). 2016-2125 : EAT3 (2020-2021) x INCA3 (2014-2015). 1940-2125 : EATi (2012-2016) x Bebe SFAE (2005). * En l'absence de sous-populations de taille 30, un relâchement des contraintes de stratification a été appliqué progressivement.	EAT1 (2000-2005), EAT2 (2007-2009), EATi (2012-2016), EAT3 (2020-2021), INCA1 (1998-1999), INCA2 (2006-2007), INCA3 (2014-2015), Bebe SFAE (2005).
q_f	Quantité quotidienne moyenne de l'aliment f consommée par un individu (en $\text{g}\cdot\text{j}^{-1}$).	* Valeurs individuelles dans les enquêtes de consommation.	Aliment, temps, âge, diplôme, sexe, taille d'agglomération, région, IMC, etc. Toutes les variables des enquêtes de consommation.	Temps, âge, diplôme, sexe, taille d'agglomération, région, IMC.	* Non directement utilisé dans ces travaux car calculs d'exposition déjà effectués dans les EATs.	INCA1 (1998-1999), INCA2 (2006-2007), INCA3 (2014-2015), Bebe SFAE (2005).
c_f	Concentration moyenne de cadmium dans l'aliment f (en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).	* Valeur ponctuelle par aliment, sauf dans EAT3 où présence d'incertitude en lien avec l'existence de différences entre agriculture biologique et conventionnelle.	Aliment, temps, et autres variables disponibles dans les enquêtes de contamination.	Aliment, temps.	* Hypothèse LB. * Indirectement utilisé dans ces travaux car calculs d'exposition déjà effectués dans les EATs.	EAT1 (2000-2005), EAT2 (2007-2009), EATi (2012-2016), EAT3 (2020-2021).
τ_{fg}	Coefficient de transfert du cadmium de l'aliment à la paroi de l'épithélium du tractus gastro-intestinal (sans unité).	* Distribution triangulaire par sexe.	Sexe.	Sexe.	* Variable d'exposition externe incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al.(2025).	Gastellu, et al. (2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par ingestion aux poussières sédimentées en milieu intérieur						
$E_{dust-ing}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion de poussières sédimentées (en $\mu\text{g.j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{dust-ing} = q_d \times c_d \times \tau_{dg}$	Age, temps, région, sexe.	Age, temps, région, sexe.	* Equation reprise de Vanacker et al., (2020) et modifiée pour inclure τ_{dg} .	Vanacker et al., (2020). Travaux présents. Références ci-après.
q_d	Quantité quotidienne moyenne de poussière ingérée par un individu (en g.j^{-1}).	Distribution log-normale par classe d'âge.	Age.	Age.	* Distribution ajustée sur quantiles.	USEPA (2011), USEPA (2017). Travaux présents.
c_d	Concentration de cadmium dans la poussière sédimentée intérieure (en $\mu\text{g.g}^{-1}$).	* Distribution gamma pour l'année de référence 2012. * Trajectoire temporelle calée sur celle de la concentration de cadmium dans l'air qui est régionalisée.	Temps, région.	Temps, région.	* Distribution ajustée sur quantiles.	Dassonville et al. 2019. Gastellu et al., 2025.
τ_{dg}	Coefficient de transfert du cadmium de la poussière ingérée vers la paroi de l'épithélium du tractus gastro-intestinal (sans unité).	* Distribution triangulaire par sexe.	Sexe.	Sexe.	* Variable d'exposition externe incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al., (2025). * Identique à τ_{fg} . * Valeur pour vie entière.	Gastellu, et al.,(2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition des fumeurs par ingestion aux fumées de cigarettes						
$E_{cig-ing}$	Exposition externe quotidienne moyenne des fumeurs au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion de fumées de cigarette (en $\mu\text{g}\cdot\text{j}^{-1}$).	* Equation de base : (1) $E_{cig-inghal} = c_{cig} \times \tau_{cs} \times q_{cig} \times \tau_{sg} \times f_c$ ou (2) $E_{cig-inghal} = c_{inhal} \times V_{puff} \times n_{puff} \times q_{cig} \times \tau_{sg} \times f_c$ * (1) ou (2) en fonction de la nature des données de contamination.	Fumeur ou non. Toutes les variables de l'enquête d'imprégnation Esteban.	Fumeur ou non.	* Equation inspirée de celle de Xie et al. (2012). * Tabagisme actuel et passé.	Travaux présentés. Xie et al. (2012). Références ci-après.
c_{cig}	Concentration de cadmium dans le tabac (en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).	Distribution empirique.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Pool de données en commun avec les données de c_{inhal} .	Revue bibliographique.
c_{inhal}	Concentration de cadmium dans la fumée inhalée issue de la cigarette (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).	Distribution empirique.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Pool de données en commun avec les données de c_{cig} .	Revue bibliographique.
τ_{cs}	Coefficient de transfert du cadmium de la cigarette vers la fumée inhalée (sans unité).	Distribution uniforme.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Valeur pour vie entière.	Revue bibliographique.
q_{cig}	Nombre de cigarettes ou équivalent fumées par jour fumé (sans unité).	Valeur ponctuelle individuelle car dans le jeu de données de référence, avec imputation aléatoire selon la distribution observée lorsque données manquantes.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents. Oleko et al. (2021).
τ_{sg}	Coefficient de transfert du cadmium de la fumée inhalée vers la paroi du tractus gastro-intestinal (sans unité).	Produit de distributions triangulaires.	Fumeur ou non, sexe.	Fumeur ou non, sexe.	* Variable d'exposition externe improprement incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al., (2025). * Valeur pour vie entière.	Gastellu et al. (2025).
f_c	Fréquence de tabagisme (en j^{-1}).	Valeur ponctuelle individuelle car dans le jeu de données de référence, avec imputation aléatoire selon une distribution uniforme lorsque données manquantes.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Valeur pour vie entière.	Travaux présents. Oleko et al. (2021).
V_{puff}	Volume d'une bouffée de fumée (en m^3).	Valeur ponctuelle.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents, jugement d'expert
n_{puff}	Nombre de bouffées par cigarette (sans unité).	Valeur ponctuelle.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents, jugement d'expert

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par ingestion aux cosmétiques						
$E_{\text{cosm-ing}}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion de cosmétiques (en $\mu\text{g.j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{\text{cosm-ing}} = \sum_{co=1}^C q_{co} \times c_{co} \times f_{co} \times \tau_{coi} \times \tau_{cog}$	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux et Roudot, 2016.	Age, sexe.	* Equation adaptée de Ficheux et Roudot (2016) et de Delmaar et al. (2023), et modifiée pour inclure τ_{ig} . * Concerne rouge à lèvres, baume à lèvres et dentifrice.	Ficheux et Roudot, (2016). Delmaar et al. (2023). Travaux présents. Références ci-après.
q_{co}	Quantité de cosmétique utilisée par usage (g),	Distribution empirique par âge.	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux et Roudot, 2016.	Age, sexe.	* Concerne rouge à lèvres, baume à lèvres et dentifrice. * Ne concerne pas les moins de 3 ans. * Pour les 4-14 ans, concerne uniquement les femmes.	Ficheux et Roudot. (2016). Delmaar et al. (2023). Travaux présents.
c_{co}	Concentration de cadmium dans un produit cosmétique ($\mu\text{g.g}^{-1}$).	Distribution empirique.	Age, sexe.	Age, sexe.		Revue bibliographique.
f_{co}	Fréquence d'usage d'un produit cosmétique (en j^{-1}).	Distribution empirique.	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux et Roudot 2016.	Age, sexe.		Ficheux et Roudot. (2016).
τ_{coi}	Facteur de rétention : Fraction d'exposition orale correspondant au rapport entre la masse de substance à laquelle le consommateur est exposée dans la cavité buccale lors de l'utilisation du produit, et la quantité (sans unité).	Déterministe, cosmétique et âge	Age, sexe, cosmétique.	Age, sexe, cosmétique.		Travaux présents, dires d'experts.
τ_{cog}	Coefficient de transfert du cadmium dans la fraction ingérée de cosmétique vers la paroi de l'épithélium du tractus gastro-intestinal (sans unité).	* Distribution triangulaire par sexe.	Age, Sexe.	Age, Sexe.	* Variable d'exposition externe incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al., 2025. * Identique à τ_{fg} . * Valeur pour vie entière.	Gastellu et al. (2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable stratification de	Commentaires	Référence
Exposition par ingestion de particules de sol						
$E_{soil-ing}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion de particules de sol (en $\mu g \cdot j^{-1}$).	* Equation de base : $E_{soil-ing} = q_s \times c_s \times \tau_{sg}$	Age, temps, rural/urbain, région, sexe.	Age, temps, rural/urbain, région, sexe.	Equation reprise de Vanacker et al., (2020) et modifiée pour inclure τ_{sg} .	Vanacker, et al. (2020). Travaux présents. Références ci-après.
q_s	Quantité quotidienne moyenne de particules de sol ingérée par un individu ($g \cdot j^{-1}$),	* Distribution log-normale par classe d'âge.	Age.	Age.	Distribution ajustée sur quantiles.	USEPA (2011), USEPA (2017). Travaux présents.
c_s	Concentration de cadmium dans les particules de sol ($\mu g \cdot g^{-1}$).	* Distribution empirique pour l'état des sols à partir de 2005. * Couplée à une équation temporelle pour la trajectoire de concentration avant 2005.	Temps, rural/urbain, région.	Temps, rural/urbain, région.		RMQS (2000-20009). BDSolU (2023-2024).
τ_{sg}	Coefficient de transfert du cadmium des particules de sol ingérée vers la paroi de l'épithélium du tractus gastro-intestinal (sans unité).	* Distribution triangulaire par sexe.	Sexe.	Sexe.	* Variable d'exposition externe incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al. (2025). * Identique à τ_{fg} . * Valeur pour vie entière.	Gastellu et al. (2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par ingestion de particules (PM10) de l'air intérieur et extérieur						
$E_{air-ing}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la paroi du tractus gastro-intestinal par ingestion de particules de sol (en $\mu\text{g.j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{air-ing} = F_a \times (c_{in,a} \times t_{in} + c_{out,a} \times (1 - t_{in})) \times \tau_{ag}$	Age, région, sexe, temps.	Age, région, sexe, temps.	Equation reprise de Vanacker et al. (2020) et modifiée pour inclure τ_{ag} .	Vanacker et al. (2020). Travaux présents. Références ci-après.
F_a	Débit ventilatoire journalier ($\text{m}^3.\text{j}^{-1}$).	* Equation déterministe dépendant de l'âge et du sexe.	Age, sexe.	Age, sexe.		Gastellu, et al. (2025).
$c_{out,a}$	Concentration de cadmium dans l'air extérieur ($\mu\text{g.m}^{-3}$).	* Equation déterministe dépendant de la région et du temps.	Région, temps.	Région, temps.	Equation reprise de Gastellu, et al. (2025) et corrigée d'un facteur 1000 pour l'unité.	Gastellu, et al. (2025). Travaux présents.
$c_{in,a}$	Concentration de cadmium dans l'air intérieur ($\mu\text{g.m}^{-3}$).	Egal à $c_{out,a}$				Travaux présents.
t_{in}	Pourcentage de temps passé dans l'environnement intérieur (sans unité).	Valeur ponctuelle par classe d'âge.	Age.	Age.		US EPA (2011).
τ_{ag}	Coefficient de transfert du cadmium des PM10 de l'air inhalée vers la paroi de l'épithélium du tractus gastro-intestinal (sans unité).	Produit de distributions triangulaires.			* Variable d'exposition externe incluse dans le modèle PBK dans Gastellu, et al. (2025). * Valeur pour vie entière.	Gastellu et al. (2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable stratification de	Commentaires	
Exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur						
$E_{dust-derm}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la peau par contact avec des poussières sédimentées (en $\mu\text{g.j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{dust-derm} = f_d \times M_{adh,d} \times \frac{t_{dust}}{24} \times S \times f_{s,d} \times c_d$	Age, sexe, temps, région.	Age, sexe, temps, région.	* Equation de base reprise de Vanacker et al. (2020).	Vanacker et al. (2020). Références ci-après.
f_d	Fraction de cadmium dans la poussière et disponible pour le contact cutané (sans unité).	Valeur ponctuelle.				Bekö et al. (2013).
$M_{adh,d}$	Débit surfacique de poussière adhérent à la peau (en $\text{g m}^{-2}.\text{j}^{-1}$).	Valeur ponctuelle.				Bekö et al. (2013).
t_{dust}	Temps d'exposition à la poussière à domicile (en h).	Valeur ponctuelle.				Hermant et al. (2018).
S	Surface corporelle (m^2).	Distribution de probabilité (log-normale tronquée, gamma, ou normale tronquée) par classe d'âge et sexe.	Age, sexe.	Age, sexe.		US EPA (2011). Travaux présents.
$f_{s,d}$	Fraction de la surface corporelle exposée à la poussière (sans unité).	Valeur ponctuelle par sexe.	Sexe.	Sexe.		US EPA (2011).
c_d	Concentration de cadmium dans la poussière sédimentée intérieure ($\mu\text{g.g}^{-1}$).	* Distribution gamma pour l'année de référence 2012. * Trajectoire temporelle calée sur celle de la concentration de cadmium dans l'air qui est régionalisée.	Temps, région.	Temps, région.	* Distribution ajustée sur quantiles.	Dassonville et al. 2019. Gastellu,et al.(2025)

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur						
$E_{air-derm}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau de la peau par contact avec les PM10 de l'air intérieur et extérieur (en $\mu\text{g j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{air-derm} = S \times f_{s,a} \times v_p \times (c_{in,a} \times t_{in} + c_{out,a}) \times (1 - t_{in}) \times 24$	Sexe, âge, région, temps.	Sexe, âge, région, temps.	* Equation de base reprise de Vanacker, et al. (2020).	Vanacker et al. (2020). Références ci-après.
S	Surface corporelle (m^2).	Distribution de probabilité (log-normale tronquée, gamma, ou normale tronquée) par classe d'âge et sexe.	Age, sexe.	Age, sexe.		US EPA (2011). Travaux présents.
$f_{s,a}$	Fraction de la surface corporelle exposée à la poussière (sans unité).	Valeur ponctuelle par sexe.	Sexe.	Sexe.		US EPA (2011).
v_p	Vitesse de dépôt des PM10 en suspension dans l'air sur la surface de la peau (en m h^{-1}).	Valeur ponctuelle.				Hermant et al. (2018).
$c_{in,a}$	Concentration de cadmium dans l'air extérieur ($\mu\text{g m}^{-3}$).	* Equation déterministe dépendant de la région et du temps.	Région, temps.	Région, temps.	Equation reprise de Gastellu, et al. (2025) et corrigée d'un facteur 1000 pour l'unité.	Gastellu, et al. (2025). Travaux présents.
$c_{out,a}$	Concentration de cadmium dans l'air intérieur ($\mu\text{g m}^{-3}$).	Egal à $c_{out,a}$				Travaux présents.
t_{in}	Pourcentage de temps passé dans l'environnement intérieur (sans unité).	Valeur ponctuelle par classe d'âge.	Age.	Age.		US EPA (2011).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition par contact cutané aux cosmétiques						
$E_{\text{cosm-derm}}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium au niveau du tractus gastro-intestinal par ingestion de cosmétiques (en $\mu\text{g j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{\text{cosm-derm}} = \sum_{co=1}^C q_{co} \times c_{co} \times f_{co} \times \tau_{coe}$	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux, A.-S., Roudot, A.-C. 2016.	Age, sexe.	* Equation adaptée de Ficheux et, Roudot (2016) et de Delmaar et al. (2023) et modifiée pour inclure τ_{coe} . * Concerne fard à joues, produits hydratants pour le corps, produits nettoyants pour le visage, crayons à yeux, fard à paupières, fond de teint, baume à lèvres, rouge à lèvres, mascara, produits de soin pour le visage, crème solaire, dentifrices.	Ficheux et Roudot (2016). Delmaar et al. (2023). Travaux présents. Références ci-après.
q_{co}	Quantité de cosmétique utilisée par usage (g),	Distribution empirique par âge.	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux, A.-S., Roudot, A.-C. 2016.	Age, sexe.	* Concerne rouge à lèvres, baume à lèvres et dentifrice. * Ne concerne pas les moins de 3 ans. * Pour les 4-14 ans, concerne uniquement les femmes.	Ficheux, et Roudot (2016). Delmaar et al. (2023). Travaux présents.
c_{co}	Concentration de cadmium dans un produit cosmétique ($\mu\text{g g}^{-1}$).	Distribution empirique.	Age, sexe.	Age, sexe.		Revue bibliographique.
f_{co}	Fréquence d'usage d'un produit cosmétique (en j^{-1}).	Distribution empirique.	Age, sexe. Autres variables dans Ficheux et Roudot, 2016.	Age, sexe.		Ficheux et Roudot (2016).
τ_{coe}	Facteur de rétention : fraction d'exposition cutanée, ou facteur de rétention, correspondant au rapport entre la masse de substance présente dans le produit utilisé et appliqué sur la peau, et la masse de substance à laquelle le consommateur est réellement exposé (sans unité).	Déterministe, cosmétique et âge dépendant.	Age, sexe, cosmétique.	Age, cosmétique, sexe.		Ficheux et, Roudot (2016).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable stratification de	Commentaires	Référence
Exposition par inhalation de particules (PM10) dans l'air intérieur et extérieur						
$E_{air-inhal}$	Exposition externe quotidienne moyenne au cadmium par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur, au niveau des alvéoles pulmonaires (en $\mu\text{g j}^{-1}$).	* Equation de base : $E_{air-inhal} = F_a \times (c_{in,a} \times t_{in} + c_{out,a} \times (1 - t_{in})) \times \tau_{al}$	Age, sexe, région, temps.	Age, sexe, région, temps.	* Equation reprise de Vanacker et al. (2020) et modifiée pour inclure τ_{al} .	Vanacker et al. (2020). Travaux présents. Références ci-après.
F_a	Débit ventilatoire journalier ($\text{m}^3 \text{j}^{-1}$).	* Equation déterministe dépendant de l'âge et du sexe.	Age, sexe.	Age, sexe.		Gastellu et al. (2025).
$c_{in,a}$	Concentration de cadmium dans l'air extérieur ($\mu\text{g m}^{-3}$).	* Equation déterministe dépendant de la région et du temps.	Région, temps.	Région, temps.	Equation reprise de Gastellu, et al.(2025) et corrigée d'un facteur 1000 pour l'unité.	Gastellu et al. (2025). Travaux présents.
$c_{out,a}$	Concentration de cadmium dans l'air intérieur ($\mu\text{g m}^{-3}$).	Egal à $c_{out,a}$				Travaux présents.
t_{in}	Pourcentage de temps passé dans l'environnement intérieur (sans unité).	Valeur ponctuelle par classe d'âge.	Age.	Age.		US EPA (2011).
τ_{al}	Coefficient de transfert du cadmium des PM10 de l'air vers les alvéoles pulmonaires (sans unité).	Loi triangulaire.			* Variable d'exposition externe improprement incluse dans le modèle PBK dans Gastellu et al. (2025). * Valeur pour vie entière.	Gastellu et al. (2025).

Variable d'exposition	Définition	Valeur ou équation de base	Variables jointes	Variable de stratification	Commentaires	Référence
Exposition des fumeurs par inhalation aux fumées de cigarettes						
$E_{cig-inhal}$	Exposition externe quotidienne moyenne des fumeurs au cadmium au niveau des alvéoles pulmonaires par inhalation directe des fumées de cigarette (en $\mu\text{g j}^{-1}$).	* Equation de base : (1) $E_{cig-inhal} = c_{cig} \times \tau_{cs} \times q_{cig} \times \tau_{sl} \times f_c$ ou (2) $E_{cig-inhal} = c_{inhal} \times V_{puff} \times n_{puff} \times q_{cig} \times \tau_{sl} \times f_c$ * (1) ou (2) en fonction de la nature des données de contamination.	Fumeur ou non. Toutes les variables de l'enquête d'imprégnation Esteban.	Fumeur ou non.	* Equation inspirée de celle de Xie et al. (2012). * Tabagisme actuel et passé.	Travaux présentés. Xie et al. (2012). Références ci-après.
c_{cig}	Concentration de cadmium dans tabac ($\mu\text{g g}^{-1}$).	Distribution empirique.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Pool de données en commun avec les données de c_{inhal} .	Revue bibliographique.
c_{inhal}	Concentration de cadmium dans la fumée inhalée issue de la cigarette ($\mu\text{g m}^{-3}$).	Distribution empirique.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Pool de données en commun avec les données de c_{cig} .	Revue bibliographique.
τ_{cs}	Coefficient de transfert du cadmium de la cigarette vers la fumée inhalée (sans unité).	Loi uniforme.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Valeur pour vie entière.	Revue bibliographique.
q_{cig}	Nombre de cigarettes ou équivalent fumées par jour fumé (sans unité).	Valeur ponctuelle individuelle car dans le jeu de données de référence, avec imputation aléatoire selon la distribution observée lorsque données manquantes.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents. Oleko et al. (2021).
τ_{sl}	Coefficient de transfert du cadmium de la fumée inhalée vers les alvéoles pulmonaires (sans unité).	Loi uniforme.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Valeur pour vie entière.	Revue bibliographique.
f_c	Fréquence de tabagisme (en j^{-1}).	Valeur ponctuelle individuelle car dans le jeu de données de référence, avec imputation aléatoire selon une loi uniforme lorsque données manquantes.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.	* Valeur pour vie entière.	Travaux présents. Oleko et al. (2021).
V_{puff}	Volume d'une bouffée de fumée (en m^3).	Valeur ponctuelle.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents, jugement d'expert
n_{puff}	Nombre de bouffées par cigarette (sans unité).	Valeur ponctuelle.	Fumeur ou non.	Fumeur ou non.		Travaux présents, jugement d'expert

5.2.2 Analyse des déterminants de l'exposition

Une analyse des déterminants socio-démographiques a été conduite à partir des données d'exposition alimentaire d'une part et des données de l'imprégnation humaine en cadmium de l'étude Esteban d'autre part (Oleko et al. 2021).

Cette analyse avait pour but d'identifier les variables socio-démographiques pouvant impacter les niveaux d'exposition au cadmium. Les variables ainsi identifiées ont ensuite pu être utilisées lorsque cela était possible comme variables de stratification afin d'agréger les expositions provenant des différentes sources et voies comme indiqué dans la **section 5.2.3**.

5.2.2.1 Analyse des déterminants socio-démographiques à partir des données d'exposition alimentaire

L'analyse s'appuie sur les données d'exposition calculées en combinant les concentrations moyenne en cadmium dans les aliments de l'étude EAT3 avec les consommations de l'étude INCA 3 (section 5.2.1.3) et concerne la population des adultes (de 18 ans inclus à 79 ans) et des enfants (3 à 17 ans). Les variables socio-démographiques sont les suivantes : sexe, âge, revenu, consommation de tabac, niveau de diplôme, taille de l'agglomération, région (voir **Tableau 4** pour les différentes classes). Cette analyse n'a pas été réalisée pour les jeunes enfants (0–3 ans) car l'étude Bebe SFAE combinée à l'étude de l'Alimentation Totale Infantile (EATi) ne contenait pas l'ensemble des variables socio-démographiques d'intérêt.

Une régression linéaire a été appliquée en prenant comme variable réponse (Y) l'exposition individuelle alimentaire moyenne journalière au cadmium (en $\mu\text{g (kg}^{-1} \text{ pc) j}^{-1}$), et les variables socio-démographiques d'intérêt : sexe (α_{sexe}), région (α_{reg}), âge (α_{age}), statut tabagique pour les adultes (α_{tabac}), taille d'agglomération ($\alpha_{\text{agгло}}$), revenu par unité de consommation (α_{RUC}), et diplôme (α_{dip}).

Tableau 4 : Variables socio-démographiques étudiées dans l'analyse des déterminants de l'exposition alimentaire au cadmium

Variables	Catégories									
Âge	3 – 10 ans		11 – 17 ans		18 – 44 ans		45 – 64 ans		65-79 ans	
Sexe	Masculin					Féminin				
Région	Nord-Ouest	Est	Centre		Ouest	Ile-de-France	Centre-Est	Sud-Ouest	Sud-Est	
Revenu par unité de consommation (€/mois)	<900		[900, 1340[			[1340, 1850[		≥ 1850		
Agglomération	Rural	2 000 – 19 999		20 000 – 99 999		≥ 100 000		≥ 10 000 000 (Agglomération de Paris)		
Diplôme de la personne de référence	pas de bac			Bac - bac + 2			> bac +3			
Statut tabagique	Ne fume pas				Fume					

5.2.2.2 Analyse des déterminants socio-démographiques à partir des données d'imprégnation humaine au cadmium

Une analyse similaire à celle réalisée à partir des expositions alimentaires a été appliquée aux données d'imprégnation des adultes (18-74 ans) et des enfants (6-17 ans) de l'étude Esteban. Les mêmes variables socio-démographiques ont donc été considérées et le jeu de données a été organisé en 5 catégories selon les spécificités du jeu de données Esteban (voir **Tableau 5**). La variable décrivant le statut tabagique a été également considérée car susceptible d'impacter les niveaux d'imprégnation.

Tableau 5. Variables socio-démographiques étudiées dans l'analyse des déterminants de l'imprégnation humaine au cadmium

Variables	Catégories								
Âge	6 – 10 ans		11 – 17 ans		18 – 44 ans		45 – 64 ans		65-75 ans
Sexe	Féminin				Masculin				
Région	Nord-Ouest	Est	Centre	Ouest	Ile-de-France	Centre-Est	Sud-Ouest	Sud-Est	
Revenu par unité de consommation (€/mois)	<900		[900, 1340[		[1340, 1850[		≥ 1850		
Diplôme de la personne de référence	pas de bac			Bac - bac + 2			≥ bac +3		
Statut tabagique	Ne fume pas			Ancien fumeur			Fume		
Lieu d’habitation	Centre-ville		Quartier périphérique		Bourg/village			Habitat dispersé, isolé	
Zone d’habitation	Résidentielle/ commerciale		Industrielle		Agricole			Naturelle	

5.2.3 Agrégation des expositions et prédiction de la cadmiurie

5.2.3.1 Agrégation des expositions et simulation des trajectoires d'exposition au cours de la vie

Les expositions calculées par source et par voie décrites dans le **Tableau 3** ont été agrégées. Pour combiner ces expositions qui proviennent d'enquêtes diverses, la méthode proposée par Vanacker et al. (2020), basée sur des simulations statistiques Monte-Carlo à deux dimensions a été utilisée. Cette méthode consiste à retenir une **population de référence représentative de la population cible (en 2014 et 2025)**, ainsi que des variables de stratification ayant un impact potentiel sur les expositions au cadmium. Ici, la population de référence choisie est l'étude Esteban représentative de la population française (entre 6 ans et 74 ans inclus) et fournissant les données d'imprégnation (Oleko et al., 2021). Pour les enfants de moins de 6 ans et les individus de plus de 74 ans, non inclus dans l'étude Esteban, des individus ont été simulés en reproduisant la structure de la population française en termes d'âge et de sexe.

Les variables de stratification sont, en plus de l'IMC (le poids corporel impactant *de facto* les expositions), celles identifiées significatives lors de l'analyse des déterminants de l'exposition effectuée à partir des imprégnations d'Esteban et des expositions alimentaires, dont la démarche est présentée en **section 5.2.2** ainsi que des variables nécessaires au calcul de certaines sources. Ces variables de stratification sont, en plus de l'Indice de Masse Corporelle (IMC) (le poids corporel impactant *de facto* les expositions), celles identifiées comme significatives lors de l'analyse des déterminants de l'exposition effectuée à partir des imprégnations de l'étude Esteban et des expositions alimentaires, ainsi que des variables nécessaires au calcul de certaines sources. Ces variables sont selon les sources l'âge, le sexe, le diplôme, le statut tabagique, la région, l'environnement de vie rural/urbain, la taille de l'agglomération, la temporalité d'exposition, comme illustré dans la **Figure 13**.

Ensuite, pour chacun des 3949 individus de l'étude Esteban et des individus supplémentaires simulés, une trajectoire d'exposition de leur naissance à 100 ans a été modélisée en procédant à un tirage aléatoire des valeurs dans les distributions des facteurs d'exposition et dans les données de concentrations pour calculer des expositions par source et voie selon des âges pivots (présentés ci-après). Pour simuler l'évolution des expositions au cours du temps pour un individu donné, de nouvelles valeurs sont attribuées à chaque nouvel âge pivot. Ces valeurs restent ensuite constantes dans l'intervalle de temps entre deux âges pivots. Les âges pivots retenus sont : naissance, 1 mois, 3 mois, 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans, 6 ans, 11 ans, 15 ans, 18 ans, 30 ans, 45 ans, 65 ans et 80 ans. Ainsi, par exemple, entre 11 ans et 15 ans (non inclus), l'exposition journalière d'un individu est calculée à partir d'un tirage dans les distributions relatives aux différentes sources. Les mêmes valeurs journalières sont utilisées pendant toute la durée de cette tranche d'âge. A partir de 15 ans, des nouvelles valeurs sont tirées à partir des distributions correspondantes et sont utilisées pour cette nouvelle tranche d'âges (15 ans -18 ans).

Les niveaux des différentes sources d'exposition évoluant au cours du temps (**Tableau 3**), cette évolution est intégrée dans le modèle. A titre d'exemple pour l'alimentation, pour un individu ayant 74 ans en 2014, il a été considéré la combinaison « EATi (2012-2016) x Bebe SFAE (2005) » de 1940 à 1943, puis la combinaison « INQA (1978) x INCA1 (1998-1999) » jusqu'en 1987 et les combinaisons suivantes jusqu'en 2040 (cf 5.2.1.3).

Afin de tenir compte de l'incertitude liée à la combinaison des données, ce processus est répété 1000 fois par individu, créant ainsi 1000 jeux de données de 3949 individus. Ces trajectoires d'exposition sont ensuite utilisées dans le modèle de toxicocinétique à base physiologique (PBK) décrit ci-après afin d'agrégier les voies d'exposition, modéliser la toxicocinétique au cours de la vie, et obtenir finalement les cadmiuries calculées (imprégnations prédites) et les contributions par source et voie d'exposition. A partir de chacune des populations simulées, des statistiques (moyenne, médiane, quantiles) des variables de sortie, comme l'imprégnation prédite, sont calculées. Les résultats sont ensuite exprimés en utilisant la médiane (Q50) des 1000 valeurs obtenues pour chacune des statistiques (moyenne, médiane, quantiles) et un intervalle d'incertitude à 95% dont les bornes sont définies par les quantiles Q2,5 et Q97,5.

Afin de vérifier la plausibilité des scénarios d'exposition retenus, les cadmiuries prédites ont ensuite été comparées à celles mesurées dans l'étude Esteban (Oleko et al. 2021) : d'une part à l'aide de fonctions de répartition des lois populationnelles de cadmiurie, et d'autre part à partir de statistiques calculés sur la distribution populationnelle des ratios individuels de

cadmiurie prédite sur cadmiurie mesurée. La distribution du ratio et les intervalles d'incertitude associés ont été résumés dans le **Tableau 11** et le **Tableau 12**.

5.2.3.2 Modèle PBK du cadmium

Le modèle PBK utilisé pour modéliser la toxicocinétique du cadmium est basé sur celui original proposé par Kjellström et Nordberg (1978). **Ce modèle PBK permet de simuler l'absorption du cadmium par la voie orale et respiratoire.** Il permet de modéliser l'accumulation du cadmium dans l'organisme et son élimination *via* les urines. Il s'agit d'un modèle à 8 compartiments comprenant les poumons, le tractus gastro-intestinal, le sang (plasma, érythrocytes et métallothionéine), le foie, les reins et « autres tissus » (**Figure 14**). Ce modèle validé par l'Anses a permis en 2012 de dériver une Valeur Toxicologique de Référence (VTR) à long terme par voie respiratoire (Anses, 2012). Puis, Béchaux et al. (2014) ont proposé des distributions de probabilité pour les paramètres physiologiques et cinétiques afin de modéliser la variabilité interindividuelle (**Annexe 3**). L'Anses a utilisé cette version pour réactualiser en 2019 la VTR par ingestion du cadmium (Anses, 2019, Leconte et al. 2021). Plus récemment, Gastellu et al. (2025) ont ajouté les équations proposées par Beaudoin et al. (2010), Mallick et al. (2019), Deepika et al. (2021), Ou et al. (2018), Ring et al. (2017) afin de modéliser l'évolution des paramètres physiologiques en fonction de l'âge et du sexe. Les auteurs ont aussi introduit un coefficient de variation afin de décrire la variabilité interindividuelle pour chacun de ces paramètres. C'est cette dernière version du modèle PBK disponible sur le dépôt GitHub (Gastellu et al 2025) qui a été utilisée après y apporter les modifications décrites ci-dessous.

Les coefficients de variation appliqués par Gastellu et al. (2025) à chaque paramètre physiologique ont été retirés, pour ne conserver que celui proposé pour la masse corporelle. La variation interindividuelle de la masse corporelle a été introduite de la façon suivante : d'une part, Gastellu et al. 2025 fournissent une fonction déterministe de la masse corporelle, fonction de l'âge et du sexe, et qui représente une trajectoire moyenne. D'autre part, dans l'étude Esteban, est donnée la masse corporelle à l'âge de référence où l'individu a été interrogé. Ces deux informations ont permis d'obtenir le rapport, à l'âge de référence, de la masse mesurée et de la masse moyenne calculée. Ce rapport est le coefficient de variabilité utilisé. Ainsi, pour chaque individu, la trajectoire de masse corporelle correspond à la trajectoire déterministe moyenne multipliée par ce coefficient. Pour éviter les masses corporelles aberrantes, ce coefficient décroît linéairement entre 0 et 3 ans, et prend pour valeur 1 à la naissance. Le poids des autres organes étant corrélé et calculé à partir du poids corporel, n'introduire la variabilité que sur le poids corporel permet de garder les corrélations qui existent physiologiquement entre les poids des différents organes. Le domaine d'application de l'équation utilisée pour modéliser le poids corporel correspond aux 0-79 ans. Après 79 ans, l'équation donne des valeurs aberrantes. Pour les individus de plus de 79 ans, le choix a été fait de prendre la valeur de masse corporelle à 79 ans.

Afin de déterminer la charge corporelle à la naissance et en l'absence de modèle placentaire, l'exposition au cadmium durant la période fœtale a été modélisée de la façon suivante : une distribution lognormale a été ajustée sur les données de concentration massique de cadmium dans le sang de cordon issues de l'étude EDEN⁴¹ et reportées dans Pesce et al. (2021). La concentration massique de cadmium dans le sang du cordon est supposée égale à la

⁴¹ <https://eden.vjf.inserm.fr/>

concentration massique dans le plasma et les globules rouges à la naissance. Connaissant les volumes de ces deux compartiments à la naissance, une masse de cadmium dans le plasma et les globules rouges à la naissance a pu être estimée. Il s'agit de la seule condition initiale non nulle du modèle PBK.

De plus, afin d'introduire l'exposition par la voie cutanée, non considérée dans le modèle original, un facteur d'absorption de 0,5% a été appliqué à la quantité d'exposition cutanée et distribuée dans le plasma (B1, **Figure 14**). Ce facteur a été estimé à partir des résultats de l'étude de Weste (1992), reprise dans ATSDR (2012). Cette étude utilisait des cellules de peau humaine (*in vitro*), et montrait que 0,1 à 0,6% du cadmium dans l'eau (chlorure de cadmium) passait dans le plasma après 16 h de perfusion. De plus, ce travail indiquait que lorsque la terre contaminée par du cadmium (13 ppb de chlorure de cadmium) était appliquée sur la surface de la peau, les niveaux de cadmium dans le plasma variaient de 0,02 à 0,07% de la dose appliquée. Ce facteur d'absorption étant 10 fois inférieur à celui observé lors d'une exposition en milieu liquide, la valeur de 0,5% proposée permet d'être protectrice selon le type de contact cutané modélisé.

Enfin, les équations différentielles utilisées dans les différents compartiments comme « Lung » (poumon), « Gut » (tractus digestif) illustrés en **Figure 14** ont été transformées en regroupant les flux entrants et sortants par couple source-voie afin de calculer les contributions des différentes sources par différentes voies d'exposition au niveau de l'imprégnation, tout en conservant les non-linéarités, en particulier le phénomène de saturation au niveau du compartiment « Uptake » : lorsque le compartiment atteint la saturation, le flux sortant total atteint une valeur seuil. Le flux sortant associé à chaque couple source-voie est alors calculé à partir du flux seuil et de la contribution relative massique du couple source-voie dans le compartiment 'Uptake'.

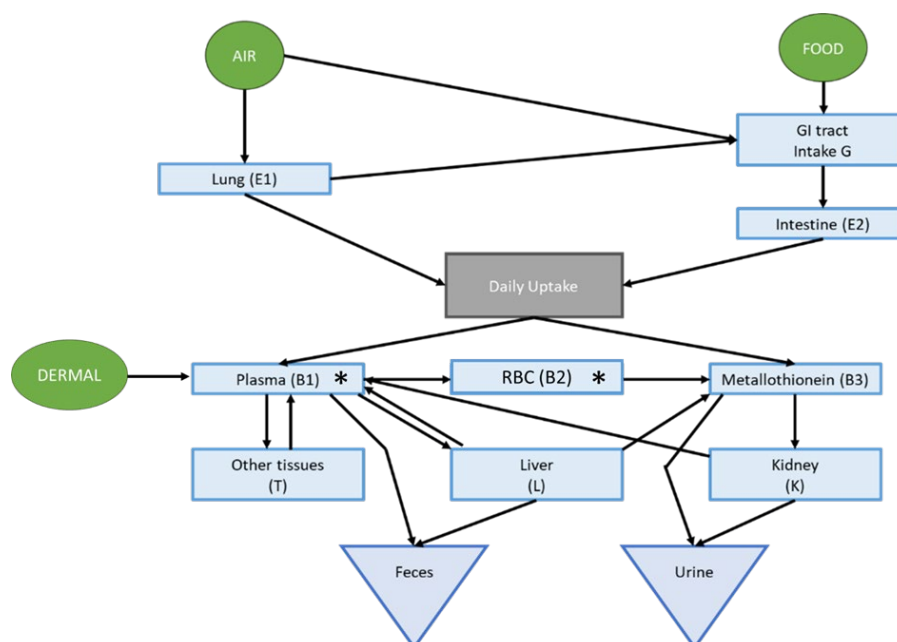


Figure 14. Représentation graphique du modèle PBK, adapté de Kjellström et Nordberg (1978). Exposition orale : tractus gastro intestinal (G), exposition par inhalation : poumons (E2), exposition cutanée : plasma (B1). * : quantité initiale de cadmium à la naissance dans le plasma (B1) et les globules rouges (B2).

5.2.4 Identification de la population présentant un risque et contributions des différentes sources et voies à l'imprégnation

5.2.4.1 Sélection de l'effet critique et de la VTR interne

La cadmiurie est considérée comme une mesure de la charge corporelle et de la quantité de cadmium accumulée dans les reins. C'est un indicateur biologique d'exposition reflétant ainsi l'exposition cumulée du cadmium dans l'organisme.

Pour estimer le pourcentage de la population générale française présentant un risque, les cadmiuries simulées en 2025 sont comparées à la valeur toxicologique de référence (VTR) sélectionnée pour le cadmium.

Le **Tableau 6** recense les VTR existantes et les plus récentes retenues par l'Anses pour le cadmium selon la voie d'exposition. Une VTR externe par voie orale, ainsi que deux VTR externes par inhalation sont identifiées, ainsi que la dose critique interne du cadmium associée à leur construction, correspondant à une valeur toxicologique de référence interne (VTR interne).

Tableau 6. Valeurs toxicologiques de référence recensées pour le cadmium (source : Anses, <https://www.anses.fr/fr/content/liste-des-valeurs-toxicologiques-de-reference-vtr>)

Substances	VTR externe		VTR interne
	Type de VTR	VTR	
Cadmium et composés (CAS 7440-43-9, 10108-6-2, 1306-19-0, 10124-36-4, 1306-23-6, 10325-94-7)	VTR long terme Inhalation (source : Anses, 2012)	0,45 µg.m ⁻³	0,5 µg Cd g ⁻¹ créatinine (source : Anses, 2019a)
	VTR cancérigène Inhalation (source : Anses, 2012)	0,3 µg.m ⁻³	
	VTR long terme Voie orale (source : Anses, 2019a)	0,35 µg.kg ⁻¹ .j ⁻¹	

En 2012, deux VTR chroniques pour la voie respiratoire pour le cadmium, l'une basée sur une étude animale de cancérogénicité, l'autre basée sur une toxicité rénale chez l'Homme, ont été dérivées par l'Anses.

Les études épidémiologiques liées à une exposition par inhalation, généralement réalisées pour la plupart en milieu professionnel soulignent, selon l'Anses (2012), des risques de cancers associés à une exposition au cadmium. De plus, le comportement tabagique des individus doit également être pris en compte. L'Anses (2012) a retenu l'augmentation de l'incidence des tumeurs pulmonaires chez l'animal comme effet critique pour construire une VTR à seuil pour les effets cancérogènes. Une VTR de 0,3 µg m⁻³ a été calculée.

Une VTR par inhalation à seuil pour les effets chroniques autres que cancérogènes a également été établie, le rein étant le principal organe cible identifié, suite à l'exposition prolongée par inhalation de cadmium (ATSDR, 2012). Cette VTR a été établie en s'appuyant sur la méta-analyse réalisée par l'Efsa (2012) permettant de définir une relation entre la concentration urinaire de cadmium et l'effet néphrotoxique (augmentation de 5% de l'atteinte tubulaire dans la population générale), et sur laquelle l'Efsa avait construit une VTR par ingestion du cadmium (Dose Hebdomadaire Tolérable) (le rein étant aussi identifiée comme le principal organe cible identifié suite à l'exposition prolongée par voie orale au cadmium). Cette méta-analyse qui regroupait 35 études épidémiologiques chez l'Homme (exposition majoritairement environnementale, avec une population principalement asiatique, réputée plus sensible au cadmium) a permis d'identifier une dose interne, soit une concentration de cadmium urinaire cible de $1 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine. A partir de cette dose interne, les concentrations atmosphériques en cadmium ont été estimées au moyen du modèle PBK du cadmium de Kjellström et Nordberg (1978). Une VTR de $0,45 \mu\text{g m}^{-3}$ a été dérivée.

En 2019, l'Anses a actualisé la VTR long-terme par voie orale. A l'issue d'une revue systématique de la littérature de nouvelles données toxicologiques et épidémiologiques publiées post-2011, la baisse de la densité osseuse (pouvant entraîner une augmentation du risque d'ostéoporose ou de fracture) a été identifiée comme l'effet le plus sensible, remplaçant alors les effets rénaux considérés auparavant comme effets critiques. L'apparition d'effets osseux a été identifiée à la plus petite dose de $0,5 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine à partir d'études épidémiologiques (Engström 2011 et 2012), mettant en évidence la relation entre une exposition prolongée au cadmium et un risque d'ostéoporose ou de fractures osseuses chez l'Homme (exposition environnementale, population fumeuse ou non). La concentration en cadmium urinaire de $0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine est alors retenue comme la dose critique interne. A partir de ce point de départ toxicologique, la VTR par ingestion a été construite par l'utilisation du modèle PBK du cadmium de Kjellström et Nordberg (1978) permettant de convertir la dose critique interne en une VTR par ingestion (Anses, 2019a). Une Dose Journalière Tolérable de $0,35 \mu\text{g Cd kg pc}^{-1} \text{ j}^{-1}$ a alors été dérivée.

Lors de l'actualisation de la VTR par ingestion par l'Anses en 2019, il est alors constaté les effets du cadmium suivant apparaissant à partir de seuils de cadmiurie de :

- $1 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine pour les effets rénaux ;
- $0,5 \mu\text{g Cd.g}^{-1}$ de créatinine pour les effets osseux.

De plus, un lien entre l'exposition au cadmium et des effets cardiovasculaires a été mis en évidence, effets qui peuvent survenir à des doses comparables à celles associées aux effets osseux. Les effets osseux ont alors été retenus comme les effets critiques, liés aux effets observables à la plus faible dose.

En revanche, les données disponibles restent insuffisantes pour établir une relation dose-réponse claire entre le cadmium et la survenue de cancers à la suite d'une exposition par voie orale. Chez l'animal, il a été montré que des effets sur d'autres organes, notamment sur les reins, apparaissaient à des doses inférieures à celles induisant le cancer. Chez l'Homme, aucune étude ne permet de montrer clairement une association entre exposition par voie orale et cancer. Néanmoins, certaines méta-analyses (Lin et al. 2016 ; Gallagher et al. 2016) suggèrent une possible augmentation du risque de cancer du sein pour des concentrations urinaires de cadmium avoisinant $0,6 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine (Anses, 2019a), soit une valeur supérieure à la dose critique de $0,5 \mu\text{g Cd.g}^{-1}$ de créatinine.

Par contre, lors d'exposition par inhalation, l'apparition de cancers pulmonaires a été observée. Ces cancers apparaissent chez des individus présentant des niveaux supérieurs à la dose critique de $0,5 \mu\text{g Cd}\cdot\text{g}^{-1}$ de créatinine, et ont été rapportés dans des études épidémiologiques menées chez des travailleurs exposés (Anses, 2012).

Par conséquent, en l'état actuel des connaissances, la VTR interne de $0,5 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine (Anses, 2019a) est la valeur la plus récente et la plus robuste, quelle que soit les voies d'exposition pour la population générale qui comprend des fumeurs et des non-fumeurs.

Par ailleurs, la VTR interne correspond à la concentration critique interne dérivée à partir d'études épidémiologiques faisant le lien entre la survenue d'effets osseux (identifiés comme l'effet critique) et l'exposition au cadmium chez une population suédoise âgée de plus de 60 ans (Engstrom et al. 2011, 2012 et Wallin et al. 2016). Afin de tenir compte de l'exposition cumulative en lien avec la longue demi-vie du cadmium, l'Anses (2019) a estimé l'évolution de la concentration urinaire de cadmium à ne pas dépasser, dès la naissance, afin d'éviter de dépasser la VTR interne ($0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) à l'âge de 60 ans. L'Anses a ainsi dérivé des valeurs sanitaires repères du cadmium urinaire (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine en fonction de l'âge), appelées « valeurs repères biologiques » (VRB), présentées en annexe 7 de son rapport (Anses. 2017, Leconte et al. 2021) et illustrées dans la **Figure 15**. Ainsi, dans ces travaux, une concentration urinaire de $0,11 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine à 20 ans conduirait à une concentration de $0,18 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine à 30 ans, de $0,32 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine à 40 ans, pour être compatible avec une concentration urinaire de cadmium n'excédant pas $0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine, à 60 ans.

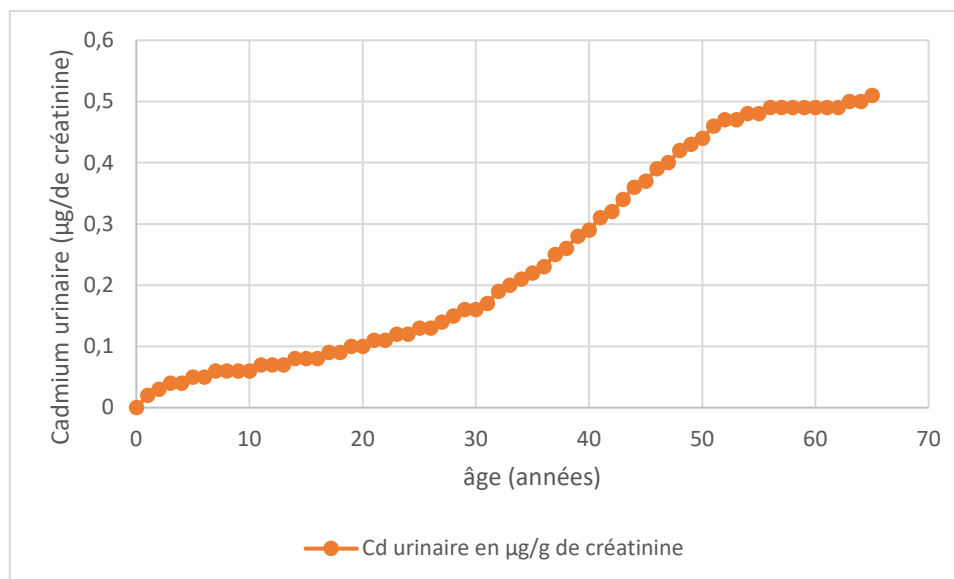


Figure 15. Valeurs repères biologiques du cadmium médiane (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) en fonction de l'âge

5.2.4.2 Calcul du pourcentage de la population présentant un risque de dépassement de la VTR et des contributions des sources et voies

Le pourcentage de la population générale française présentant un risque a ensuite été estimé en calculant le pourcentage d'individus par tranche d'âge ayant des cadmiuries prédites en 2025 supérieures aux valeurs sanitaires de référence.

Les cadmiuries prédites ont ainsi été comparées à :

1- la Valeur Toxicologique de référence interne (VTR interne) de $0,5 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine, appliquée pour tous les individus quel que soit leur âge ;

2- la trajectoire de valeurs repères biologiques (VRB) par âge.

Puis, la contribution des différentes sources par différentes voies pour l'ensemble de la population a ensuite été caractérisée.

Une analyse plus détaillée de la source alimentaire a été effectuée afin d'identifier les groupes d'aliments les plus contributeurs à l'imprégnation au cadmium. La décomposition de la source alimentaire contribuant à la cadmiurie n'ayant pas pu être entreprise sur l'ensemble des groupes alimentaires dans le temps imparti à l'expertise, elle a été réalisée sur une vingtaine de groupes, le reste étant regroupé dans une catégorie 'Autres groupes alimentaires'.

Ces 20 groupes alimentaires correspondent à la réunion des 5 premiers contributeurs à l'exposition alimentaire de toutes les sous-populations discriminées par classe d'âge et sexe. Dans un second temps, la catégorie 'Autres groupes alimentaires' a ensuite été désagrégée en termes d'exposition externe, offrant une approximation de la cadmiurie.

5.3 Résultats

5.3.1 Analyse des déterminants de l'exposition

Pour rappel, cette analyse vise à identifier les déterminants socio-démographiques susceptibles d'impacter les niveaux d'exposition humaine au cadmium. Les analyses sont effectuées à partir des expositions alimentaires de l'étude EAT3 d'une part, et d'autre part, à partir de l'imprégnation humaine issue de l'étude Esteban. Les déterminants identifiés ont été utilisés pour agréger les expositions et simuler les trajectoires d'exposition au cours de la vie comme expliqué en **section 5.2.2**, ainsi que pour identifier d'éventuelles disparités pour l'analyse d'options d'action (cf. chapitres 6 et 7).

5.3.1.1 Analyse des déterminants socio-démographiques à partir des expositions alimentaires

Les résultats des régressions linéaires sont présentés dans le **Tableau 7** pour les adultes (18 à 79 ans) et le **Tableau 8** pour les enfants (3 à 17 ans) :

1) la colonne « Variable » correspond à la variable socio-démographique,

2) la colonne « Catégorie » indique la sous-population décrite par cette variable,

- 3) la colonne « Estimation » relative au coefficient indique la différence d'exposition en lien avec un changement de catégorie de variable, toutes choses égales par ailleurs,
- 4) la colonne « Erreur-type » indique l'incertitude dans l'estimation du coefficient,
- 5) la colonne « Valeur t » correspond à la valeur du test de Student (test t),
- 6) la colonne « Valeur p » indique la significativité du test t (les différences sont significatives uniquement si la valeur p est inférieure à 0,05).

Pour chaque variable, le coefficient associé représente, toutes choses égales par ailleurs, l'écart entre l'exposition du sous-groupe et celle du sous-groupe de référence, c'est-à-dire la valeur initiale de chaque variable. On ne trouve donc pas d'estimation de corrélation associée au sous-groupe de référence pour chaque variable. Par exemple, pour la variable « Sexe », l'estimation du coefficient représente l'écart d'exposition entre la population « Masculin » (homme/garçon) par rapport à la catégorie « Féminin » (les femmes/filles), toutes choses égales par ailleurs.

Tableau 7 : Tableau de régression linéaire des expositions alimentaires des adultes au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives ($p < 0.05$) exprimées en italique ⁴²

ADULTES					
Variables	Catégories	Estimation	Erreur-type	Valeur t	Valeur p
Interception		-1.910	0.044	-43.039	< 2.E-16
Sexe	Féminin (référence)				
	<i>Masculin</i>	<i>0.088</i>	<i>0.023</i>	<i>3.839</i>	<i>1.28E-04</i>
Age	18-44 ans (référence)				
	45-64 ans	0.019	0.027	0.702	4.83E-01
	65-79 ans	0.013	0.036	0.350	7.26E-01
Taille d'agglomération	Rural (référence)				
	<i>2000-19999</i>	<i>-0.096</i>	<i>0.035</i>	<i>-2.752</i>	<i>5.98E-03</i>
	<i>20000-99999</i>	<i>-0.166</i>	<i>0.041</i>	<i>-4.044</i>	<i>5.46E-05</i>
	<i>>100000</i>	<i>-0.067</i>	<i>0.031</i>	<i>-2.143</i>	<i>3.22E-02</i>
	<i>>10000000 (Agglo Paris)</i>	<i>-0.346</i>	<i>0.068</i>	<i>-5.073</i>	<i>4.30E-07</i>
Région	Nord-Ouest (référence)				
	<i>Est</i>	<i>-0.136</i>	<i>0.049</i>	<i>-2.757</i>	<i>5.89E-03</i>
	Centre	-0.056	0.045	-1.236	2.17E-01
	<i>Ouest</i>	<i>-0.091</i>	<i>0.041</i>	<i>-2.215</i>	<i>2.69E-02</i>
	Île de France	0.095	0.065	1.471	1.41E-01
	<i>Centre-Est</i>	<i>-0.158</i>	<i>0.044</i>	<i>-3.581</i>	<i>3.51E-04</i>
	<i>Sud-Ouest</i>	<i>-0.096</i>	<i>0.044</i>	<i>-2.190</i>	<i>2.86E-02</i>
	<i>Sud-Est</i>	<i>-0.091</i>	<i>0.044</i>	<i>-2.038</i>	<i>4.17E-02</i>
Revenu par unité de consommation (€/mois)	<900 (référence)				
	900 - 1340	0.024	0.034	0.698	4.86E-01
	1340 - 1850	0.043	0.034	1.245	2.13E-01
	>1850	0.013	0.034	0.385	7.00E-01
Diplôme	Pas de bac (référence)				
	bac – bac +2	-0.010	0.035	-0.279	7.80E-01
	<i>> bac +3</i>	<i>0.094</i>	<i>0.029</i>	<i>3.270</i>	<i>1.10E-03</i>
Statut tabagique	Ne fume pas (référence)				
	Fume	-0.030	0.027	-1.118	2.64E-01
R-multiple		0.045			

⁴² Les régressions ont été réalisées sur le logarithme népérien (ln) de l'exposition

Tableau 8 : Tableau de régression linéaire des expositions alimentaires des enfants au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives ($p < 0.05$) exprimées en italique ⁴³

ENFANTS					
Variable	Catégorie	Estimation	Erreur-type	Valeur t	Valeur p
Interception		-1.063	0.044	-23.969	< 2.E-16
Sexe	Féminin (référence)				
	<i>Masculin</i>	<i>0.124</i>	<i>0.024</i>	<i>5.278</i>	<i>1.48E-07</i>
Age	3-10 ans (référence)				
	<i>11-17 ans</i>	<i>-0.583</i>	<i>0.024</i>	<i>-23.848</i>	<i>< 2.E-16</i>
Taille d'agglomération	Rural (référence)				
	2000-19999	-0.058	0.037	-1.563	1.18E-01
	20000-99999	-0.001	0.040	-0.037	9.71E-01
	>100000	-0.035	0.034	-1.046	2.96E-01
	<i>>1000000 (Agglo Paris)</i>	<i>-0.237</i>	<i>0.085</i>	<i>-2.792</i>	<i>5.31E-03</i>
Région	Nord-Ouest (référence)				
	Est	-0.086	0.054	-1.579	1.15E-01
	<i>Centre</i>	<i>-0.103</i>	<i>0.048</i>	<i>-2.154</i>	<i>3.14E-02</i>
	<i>Ouest</i>	<i>-0.103</i>	<i>0.044</i>	<i>-2.355</i>	<i>1.87E-02</i>
	<i>Île de France</i>	<i>0.222</i>	<i>0.085</i>	<i>2.599</i>	<i>9.43E-03</i>
	Centre-Est	-0.053	0.044	-1.206	2.28E-01
	<i>Sud-Ouest</i>	<i>-0.119</i>	<i>0.049</i>	<i>-2.450</i>	<i>1.44E-02</i>
	Sud-Est	-0.017	0.046	-0.378	7.05E-01
Revenu de la personne de référence	<900 (référence)				
	900 - 1340	-0.021	0.032	-0.668	5.05E-01
	1340 - 1850	-0.033	0.034	-0.972	3.31E-01
	>1850	0.000	0.041	0.001	9.99E-01
Diplôme de la personne de référence	Pas de bac (référence)				
	bac - bac +2	0.017	0.035	0.479	6.32E-01
	>bac +3	0.040	0.030	1.333	1.83E-01
R-multiple		0.30			

L'analyse a montré que l'ensemble des variables socio-démographiques incluses dans la régression expliquent conjointement 4,5 % de la variance de l'exposition alimentaire chez les adultes, contre 30 % chez les enfants (R-multiple). Il convient de souligner que certaines variables non observées, potentiellement corrélées aux variables socio-démographiques (telles que l'aversion au risque, les habitudes alimentaires individuelles ou encore l'état de santé), peuvent engendrer un biais des estimateurs.

⁴³ Les régressions ont été réalisées sur le logarithme népérien (ln) de l'exposition

Il peut être néanmoins relevé que chez les adultes, les femmes présentent en moyenne une exposition alimentaire inférieure à celle des hommes, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire une fois que les effets de l'âge, de la taille de l'agglomération, de la région, du niveau de revenu, du diplôme et du statut tabagique sur l'exposition alimentaire sont pris en compte. Aucun effet significatif de l'âge sur l'exposition alimentaire n'a été observé. La taille de l'agglomération a un effet significatif sur l'exposition alimentaire : les populations vivant dans des agglomérations de moins de 2 000 habitants (zones rurales) sont les plus exposées, alors que celles résidant dans des agglomérations de plus de 10 000 000 d'habitants (agglomération parisienne) sont les moins exposées. Pour la variable « région », des disparités régionales d'exposition sont observées. La région Nord-Ouest, qui est la région de référence, apparaît comme la plus exposée. En comparaison, les régions Est, Ouest, Centre-Est, Sud-Ouest et Sud-Est présentent des niveaux d'exposition significativement plus faibles. L'exposition est plus élevée chez les personnes diplômées de l'enseignement supérieur (bac +3 ou plus) que chez celles non diplômées. Enfin, aucune différence significative d'exposition alimentaire au cadmium n'a été mise en évidence entre les différentes catégories de revenus, ni entre les fumeurs et les non-fumeurs.

Chez les enfants, toutes choses égales par ailleurs, les filles présentent en moyenne une exposition alimentaire inférieure à celle des garçons. L'effet de l'âge est significatif : les enfants âgés de 11 à 17 ans sont moins exposés que ceux du groupe 3–10 ans. Ces différences pourraient s'expliquer en partie par le poids corporel, qui n'est pas pris en compte dans le modèle de régression. La taille de l'agglomération n'a globalement pas d'effet significatif, à l'exception de la plus grande agglomération (correspondant à l'agglomération parisienne, > 10 000 000 d'habitants), où les enfants sont significativement moins exposés que ceux vivant en milieu rural. Concernant la variable « région », des disparités régionales d'exposition sont observées, bien que différentes de celles constatées chez les adultes. Par rapport à la région Nord-Ouest, les enfants résidant dans les régions Centre, Ouest et Sud-Ouest présentent des niveaux d'exposition significativement plus faibles. À l'inverse, contrairement à ce qui a été observé chez les adultes, la région Île-de-France se distingue par des niveaux d'exposition significativement plus élevés. Enfin, aucune différence significative n'a été observée selon le niveau de revenu ou le diplôme de la personne de référence du foyer.

5.3.1.2 Analyse des déterminants socio-démographiques à partir de l'imprégnation humaine au cadmium

Le présent travail complète l'étude Esteban en exploitant les données disponibles sous l'angle socio-économique. En amont, au regard des données de la littérature sur les liens entre niveaux socio-économiques et exposition au cadmium, non-spécifiquement liées à l'alimentation, il est souligné que l'étude Esteban (Oleko et al., 2021) met en évidence des différences d'imprégnation du cadmium en fonction de l'âge. Par ailleurs, cette même étude rapporte une imprégnation plus élevée chez les femmes que chez les hommes. Cette différence hommes/femmes n'a pas été observée lors de l'analyse des déterminants socio-démographiques réalisée en tenant compte de l'exposition par l'alimentation uniquement. Cela peut s'expliquer par le fait que l'absorption du cadmium dans l'organisme peut être plus élevée chez les femmes (supérieure à 10% tandis qu'elle est de l'ordre de 5% chez les hommes) au regard des réserves abaissées de certains éléments comme le fer, le calcium et les protéines, pouvant être notamment plus faibles selon certaines périodes de la vie, comme les grossesses par exemple (Kippler et al. 2007).

Toujours selon les résultats de l'étude Esteban, le principal déterminant non alimentaire identifié de l'exposition au cadmium dans la population générale est le tabagisme. Or, le tabagisme pourrait être marqué par des inégalités sociales. Cependant, cette dimension des inégalités sociales au regard de l'exposition aux substances chimiques reste peu traitée dans la littérature scientifique.

Dans cette perspective, l'étude de Tratnik et al. (2022) menée dans le cadre du projet européen HBM4EU apporte un éclairage intéressant. Celle-ci intègre le niveau d'éducation comme indicateur socio-économique significatif dans l'analyse de l'exposition au cadmium. Les résultats montrent une corrélation inverse entre niveau d'éducation et imprégnation au cadmium à l'échelle globale de l'échantillon européen. L'étude souligne que cette relation pourrait être liée au tabagisme. L'étude suggère également l'existence de relations inverses dans certains cas, notamment lorsque des régimes alimentaires plus riches en produits végétaux sont associés à des niveaux socio-économiques plus élevés. Ces éléments rendent l'interprétation de la relation entre niveau socio-économique et exposition au cadmium complexe et multifactorielle.

Les résultats des régressions linéaires conduites dans cette expertise pour les adultes et les enfants sont présentés dans les **Tableau 9** et **Tableau 10** respectivement.

Tableau 9 : Tableau de régression linéaire des imprégnations humaines des adultes au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives exprimées en italique ⁴⁴

ADULTES					
Variable	Catégorie	Estimation	Erreur-type	Valeur t	Valeur p
Interception		-1.04787	0.08423	-12.441	< 2.E-16
Sexe	Féminin (référence)				
	<i>Masculin</i>	<i>-0.394</i>	<i>0.030</i>	<i>-13.214</i>	<i>< 2.E-16</i>
Âge	18 – 44 ans (référence)				
	<i>45-64 ans</i>	<i>0.593</i>	<i>0.035</i>	<i>17.141</i>	<i>< 2.E-16</i>
	<i>65-75 ans</i>	<i>0.904</i>	<i>0.048</i>	<i>18.787</i>	<i>< 2.E-16</i>
<i>Lieu d'habitation</i>	Centre-ville (référence)				
	Quartier périphérique	0.028	0.041	0.673	5.01E-01
	Bourg/village	0.015	0.047	0.329	7.42E-01
	<i>Dispersé, isolé</i>	<i>-0.238</i>	<i>0.071</i>	<i>-3.333</i>	<i>8.73E-04</i>
<i>Zone d'habitation</i>	Résidentielle/commerciale (référence)				
	<i>Industrielle</i>	<i>0.501</i>	<i>0.109</i>	<i>4.588</i>	<i>4.73E-06</i>
	<i>Agricole</i>	<i>0.100</i>	<i>0.049</i>	<i>2.023</i>	<i>4.32E-02</i>
	Naturelle	0.068	0.063	1.078	2.81E-01
<i>Région</i>	Nord-Ouest (référence)				
	Est	-0.121	0.066	-1.825	6.82E-02
	Centre	0.099	0.064	1.554	1.20E-01
	<i>Ouest</i>	<i>0.242</i>	<i>0.057</i>	<i>4.241</i>	<i>2.31E-05</i>
	<i>Île de France</i>	<i>0.285</i>	<i>0.059</i>	<i>4.845</i>	<i>1.35E-06</i>
	Centre-Est	-0.102	0.059	-1.747	8.09E-02
	Sud-Ouest	0.054	0.060	0.890	3.74E-01
	Sud-Est	0.064	0.063	1.009	3.13E-01
<i>Revenu par unité de consommation (€/mois)</i>	<900 (référence)				
	900 – 1340	0.066	0.058	1.135	2.56E-01
	1340 - 1850	0.044	0.056	0.777	4.37E-01
	<i>>1850</i>	<i>0.102</i>	<i>0.050</i>	<i>2.027</i>	<i>4.28E-02</i>
Diplôme de la personne de référence	Pas de bac (référence)				
	bac - bac +2	0.037	0.052	0.702	4.83E-01
	>bac +3	-0.025	0.057	-0.437	6.62E-01
<i>Statut tabagique</i>	Ne fume pas (référence)				
	Ancien fumeur	0.085	0.046	1.871	6.14E-02
	<i>Fumeur</i>	<i>0.361</i>	<i>0.037</i>	<i>9.892</i>	<i>< 2.E-16</i>
R-multiple		0.29			

⁴⁴ Les régressions ont été réalisées sur le logarithme népérien (ln) de l'exposition

Tableau 10 : Tableau de régression linéaire des imprégnations humaines des enfants au cadmium en fonction des sept variables socio-démographiques sélectionnées, avec les variables significatives exprimées en italique ⁴⁵

ENFANTS					
Variable	Catégorie	Estimation	Erreur-type	Valeur t	Valeur p
Interception		-0.913	0.126	-7.244	9.16E-13
Sexe	Féminin (référence)				
	Masculin	0.037	0.045	0.819	4.13E-01
Âge	6-10 ans (référence)				
	11-17 ans	<i>-0.244</i>	<i>0.047</i>	<i>-5.198</i>	<i>2.48E-07</i>
Lieu d'habitation	Centre-ville (référence)				
	Quartier périphérique	0.063	0.067	0.932	3.52E-01
	Bourg/village	0.006	0.070	0.086	9.31E-01
	Dispersé, isolé	-0.015	0.101	-0.148	8.82E-01
Zone d'habitation	Résidentielle/commerciale (référence)				
	Industrielle	0.404	0.242	1.666	9.60E-02
	Agricole	-0.037	0.073	-0.512	6.09E-01
	Naturelle	0.083	0.085	0.973	3.31E-01
Région	Nord-Ouest (référence)				
	Est	0.028	0.096	0.292	7.70E-01
	Centre	0.077	0.099	0.778	4.37E-01
	Ouest	0.073	0.082	0.886	3.76E-01
	Île de France	<i>0.320</i>	<i>0.087</i>	<i>3.655</i>	<i>2.72E-04</i>
	Centre-Est	-0.151	0.080	-1.879	6.06E-02
	Sud-Ouest	-0.104	0.099	-1.050	2.94E-01
	Sud-Est	0.149	0.089	1.672	9.49E-02
Revenu par unité de consommation (€/mois)	<900 (référence)				
	900 - 1340	-0.098	0.061	-1.593	1.11E-01
	1340 - 1850	-0.047	0.065	-0.725	4.69E-01
	>1850	-0.038	0.062	-0.615	5.39E-01
Diplôme de la personne de référence	Pas de bac (référence)				
	bac – bac +2	<i>-0.317</i>	<i>0.098</i>	<i>-3.244</i>	<i>1.22E-03</i>
	>bac +3	<i>-0.371</i>	<i>0.098</i>	<i>-3.780</i>	<i>1.67E-04</i>
R-multiple			0.10		

L'analyse a montré que l'ensemble des variables socio-démographiques incluses dans la régression expliquent conjointement 28,8 % de la variance de l'imprégnation au cadmium chez les adultes, contre 10 % chez les enfants.

Il est constaté que, chez les adultes, les femmes présentent en moyenne une imprégnation au cadmium supérieure à celle des hommes, toutes choses égales par ailleurs. Cette observation contraste avec les résultats de l'analyse des déterminants socio-démographiques basée

⁴⁵ Les régressions ont été réalisées sur le logarithme népérien (ln) de l'exposition

uniquement sur l'exposition alimentaire présentée dans la section précédente, et peut s'expliquer, comme mentionné auparavant, par les différences physiologiques d'absorption du cadmium. L'effet de l'âge est statistiquement significatif : comparativement aux 18-44 ans, les personnes plus âgées (45 à 75 ans) sont plus imprégnées. Le lieu d'habitation semble jouer un rôle dans l'imprégnation au cadmium. En effet, les personnes résidant dans des zones dispersées ou isolées présentent une imprégnation moins élevée que celles vivant en centre-ville. Les habitants des zones industrielles et ceux des zones agricoles sont aussi plus imprégnés que ceux des zones résidentielles ou commerciales. A l'échelle régionale, quelques disparités d'exposition sont observées : la région Ouest et l'Île de France présentent des niveaux d'imprégnation significativement plus élevés qu'en région Nord-Ouest, la région de référence. L'imprégnation au cadmium semble être plus importante pour les individus au revenu supérieur à 1850€/mois comparés à ceux ayant un revenu inférieur à 900€/mois. En revanche, elle ne diffère pas de manière significative selon les catégories de diplôme. Enfin, le statut tabagique joue un rôle explicatif dans l'imprégnation au cadmium chez les adultes : le fait d'être fumeur tend à augmenter le niveau d'imprégnation, toutes choses égales par ailleurs.

Chez les enfants, parmi les variables socio-démographiques significatives qui contribuent à expliquer la variation de l'imprégnation, l'âge joue de nouveau un rôle important — un effet en partie attribuable au biais lié au poids corporel, comme mentionné précédemment. Comme pour les adultes, les enfants résidant en Île-de-France présentent en moyenne des niveaux d'imprégnation plus importants que ceux de la région Nord-Ouest. Enfin, le niveau de diplôme de la personne de référence du foyer est négativement associé au niveau d'imprégnation des enfants.

En conclusion, cette analyse a permis d'identifier les variables socio-démographiques pertinentes à utiliser comme variables de stratification pour agréger les expositions issues de plusieurs sources, simuler les trajectoires d'exposition au cours de la vie et les doses internes associées. Ces variables sont les suivantes : sexe, âge, région, revenu, diplôme, taille de l'agglomération et statut tabagique.

Cependant, au vu du faible pourcentage de variance expliquée, il n'est pas possible d'identifier des déterminants expliquant une part conséquente des expositions alimentaires et de l'imprégnation humaine au cadmium. Cela est probablement lié au fait que de nombreux facteurs influencent l'alimentation.

Il est conclu qu'au vu de ces résultats, il est difficile d'identifier d'éventuelles disparités pour l'analyse d'options d'action.

5.3.2 Prédiction de la cadmiurie et identification des sources et voies majoritaires

5.3.2.1 Comparaison des cadmiuries prédites avec celles mesurées dans Esteban

Les **Figure 16** et **Figure 17** présentent, par classe d'âge et respectivement pour la population générale française non fumeuse et fumeuse, une comparaison entre les cadmiuries prédites avec le modèle de trajectoires d'exposition (**section 5.2.3.2**) et celles mesurées dans l'étude Esteban. La classe d'âge pour laquelle les valeurs prédites sont les plus proches des valeurs mesurées est la classe des 45-64 ans pour la population générale non-fumeuse et fumeuse,

et celle des 65-79 ans pour la population des fumeurs. Chez les non-fumeurs (**Figure 16**), les expositions sont sous-estimées pour toutes les classes d'âges, et la dispersion des prédictions est plus faible que celle des observations. C'est le cas en particulier pour les enfants (<18 ans). Chez les fumeurs (**Figure 17**), les expositions prédites sont également sous-estimées chez les moins de 45 ans, mais pas chez les individus plus âgés, en particulier ceux appartenant à la classe des 65-79 ans.

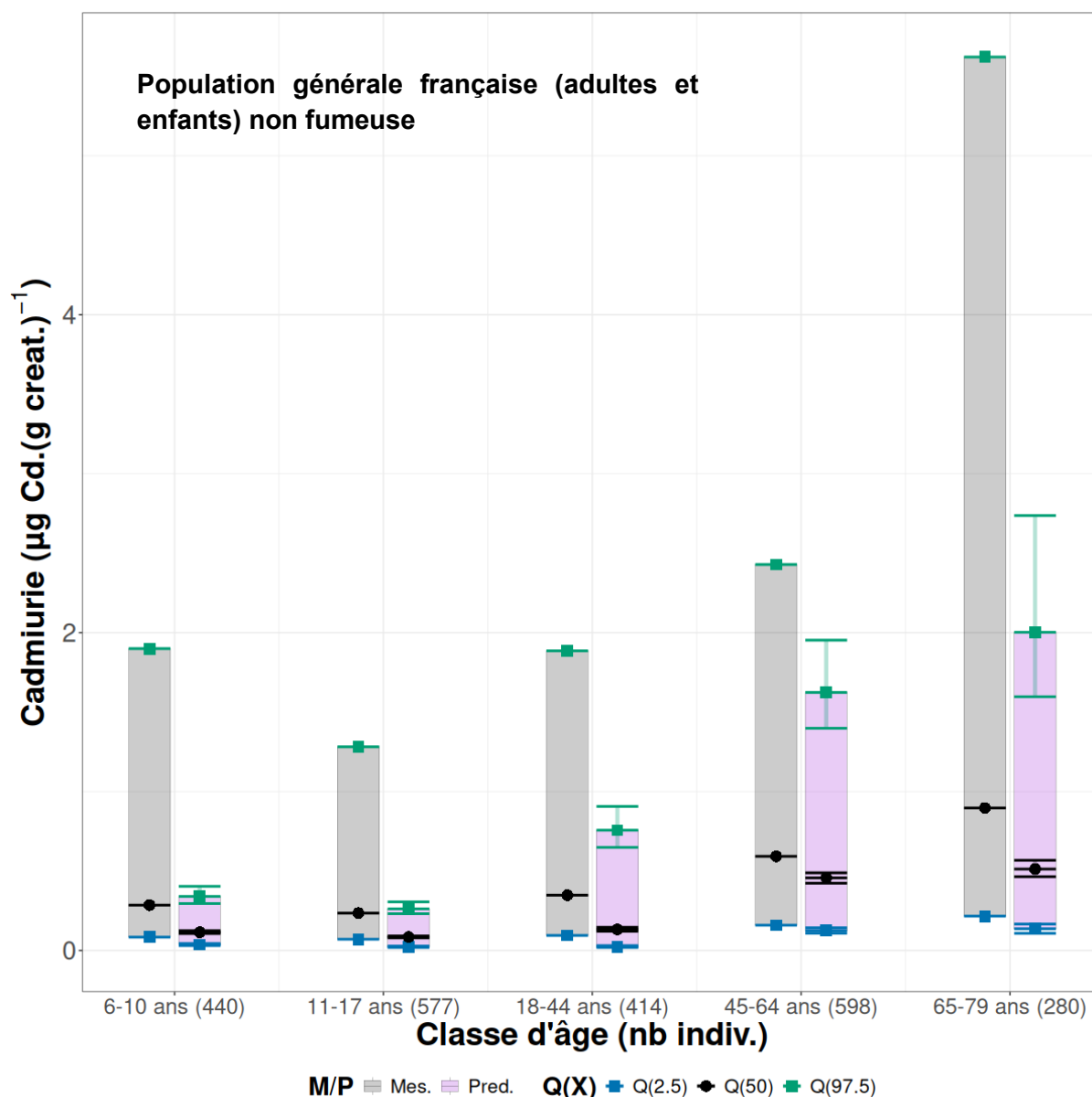


Figure 16. Comparaison par classe d'âge des cadmiuries prédites pour la population générale (adultes et enfants) non fumeuse française avec les cadmiuries mesurées dans l'étude Esteban. Les barres grises correspondent aux valeurs mesurées et les violettes aux valeurs prédites. Les extrémités des barres représentent les quantiles Q2,5 (bleu) et Q97,5 (vert) des cadmiuries, et donc la variabilité interindividuelle. A l'intérieur des barres, le point noir correspond à la médiane des cadmiuries (Q50, noir). Pour les cadmiuries prédites, chaque quantile est représenté par sa valeur médiane (carrés bleu et vert, rond noir) et son intervalle d'incertitude à 95% (moustache de la même couleur).

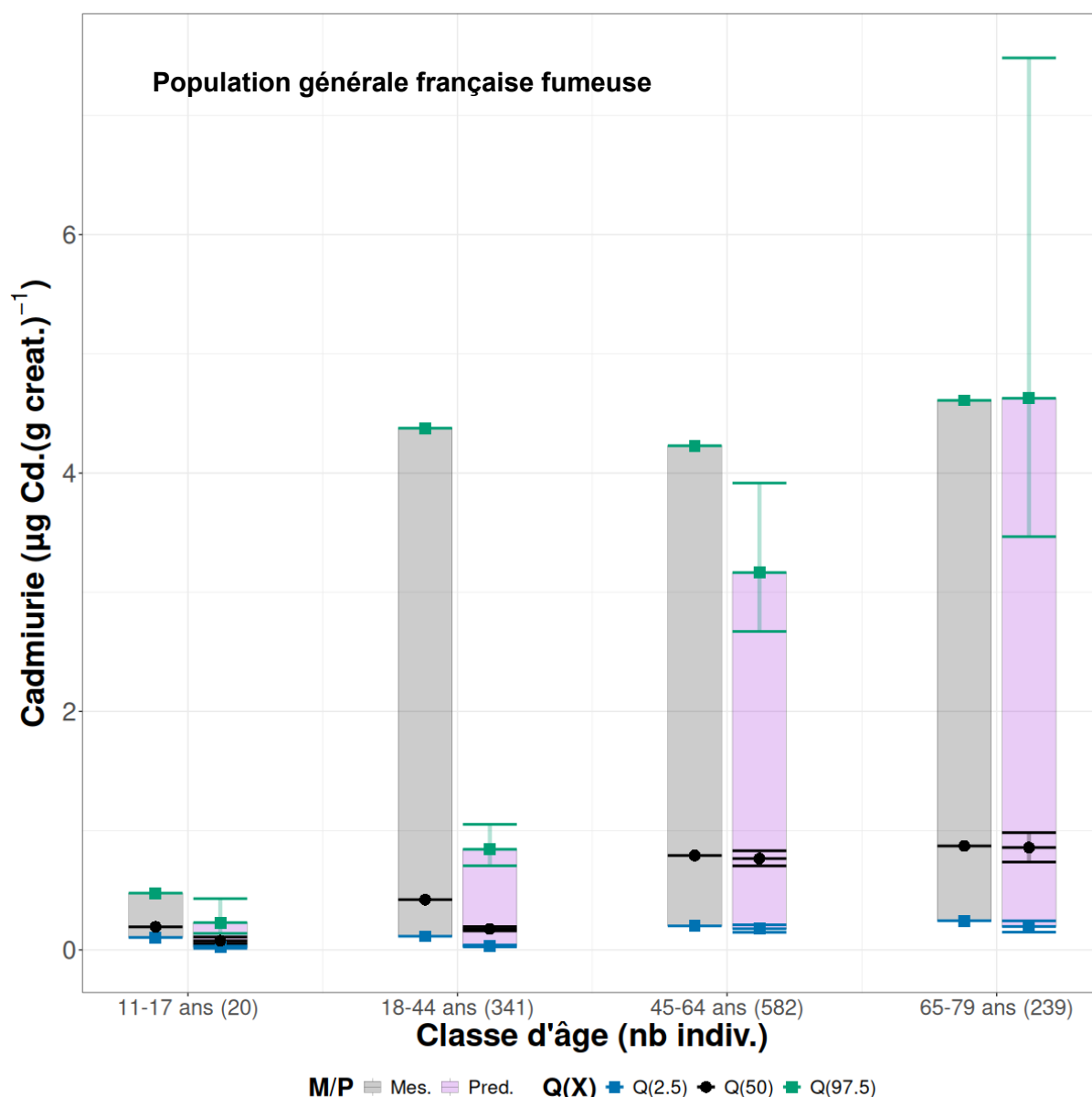


Figure 17. Comparaison par classe d'âge des cadmiuries prédites pour la population générale fumeuse française avec les cadmiuries mesurées dans l'étude Esteban. Les barres grises correspondent aux valeurs mesurées et les violettes aux valeurs prédites. Les extrémités des barres représentent les quantiles Q2,5 (bleu) et Q97,5 (vert) des cadmiuries, et donc la variabilité interindividuelle. A l'intérieur des barres, le point noir correspond à la médiane des cadmiuries (Q50, noir). Pour les cadmiuries prédites, chaque quantile est représenté par sa valeur médiane (carrés bleu et vert, rond noir) et son intervalle d'incertitude à 95% (moustache de la même couleur).

Ces résultats sont confirmés dans le **Tableau 11** et le **Tableau 12** présentant, respectivement pour la population générale française non fumeuse et fumeuse, la moyenne et les quantiles, par classe d'âge, du ratio calculés entre les 1000 valeurs prédites pour chacun des individus et leur cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban. La distribution des ratios et des intervalles d'incertitude montre que pour la population générale française non-fumeuse, le ratio est en moyenne de 0,56 pour les enfants 6 – 10 ans, de 0,49 pour les individus de 11-17 ans ainsi de 0,61 pour les individus adultes de moins de 45 ans. Les valeurs prédites d'exposition sous-estiment donc en moyenne les valeurs observées d'exposition de 39% à 51%. En revanche, le ratio moyen est proche de 1 (0,98) pour la classe d'âge 45-64 ans, indiquant une bonne

concordance entre les concentrations mesurées et celles estimées par le modèle. Pour la classe d'âge 65-79 ans, le ratio moyen est de 0,8, ce qui indique une sous-estimation moyenne de 20% de l'exposition par les prédictions du modèle pour cette classe d'âge. La tendance à la sous-estimation des expositions par le modèle est confirmée par les valeurs médianes des ratios qui sont systématiquement inférieures à 1, pour toutes les classes d'âges de la population non fumeuse.

Pour la population générale française fumeuse, le ratio moyen est d'environ 0,5 chez les moins de 45 ans (classes d'âge 11-17 ans et 18-44 ans), indiquant que les valeurs mesurées sont en moyenne deux fois plus élevées que celles prédites. Cependant, la taille réduite de l'échantillon pour la classe d'âge 11-17 ans ($n = 20$) limite la portée des conclusions pouvant être tirées. En revanche, la tendance s'inverse chez les individus de plus de 45 ans (45-64 ans et 65-79 ans), avec un ratio moyen avoisinant 1,5, traduisant des valeurs prédites globalement supérieures aux valeurs observées. Pour ces classes d'âge, la médiane du ratio est en revanche proche de 1 (0,96), suggérant une bonne concordance entre les concentrations mesurées et celles estimées par le modèle.

Tableau 11. Moyenne et quantiles de la population générale non-fumeuse française, par classe d'âge, du ratio calculés entre les 1000 valeurs prédites pour chacun des individus et sa cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban. Pour chaque classe d'âge, le nombre d'individus est donné entre parenthèses. Pour chaque moyenne ou quantile, la médiane et l'intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5] sont présentés.

	Moyenne	Q(0,05)	Q(0,5)	Q(0,95)
6-10 ans (440)	0,56 [0,52 ; 0,61]	0,04 [0,03 ; 0,05]	0,38 [0,35 ; 0,42]	1,28 [1,12 ; 1,47]
11-17 ans (577)	0,49 [0,45 ; 0,52]	0,04 [0,03 ; 0,05]	0,35 [0,32 ; 0,38]	1,07 [0,95 ; 1,2]
18-44 ans (414)	0,61 [0,56 ; 0,67]	0,05 [0,03 ; 0,06]	0,4 [0,36 ; 0,44]	1,37 [1,21 ; 1,58]
45-64 ans (598)	0,98 [0,92 ; 1,06]	0,13 [0,11 ; 0,15]	0,75 [0,7 ; 0,82]	2,02 [1,82 ; 2,26]
65-79 ans (280)	0,8 [0,73 ; 0,9]	0,09 [0,07 ; 0,11]	0,57 [0,51 ; 0,63]	1,75 [1,51 ; 2,05]

Tableau 12. Moyenne et quantiles de la population générale fumeuse française, par classe d'âge, du ratio calculés entre les 1000 valeurs prédites pour chacun des individus et sa cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban. Pour chaque classe d'âge, le nombre d'individus est donné entre parenthèses. Pour chaque moyenne ou quantile, la médiane et l'intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5] sont présentés.

	Moyenne	Q(0,05)	Q(0,5)	Q(0,95)
11-17 ans (20)	0,47 [0,34 ; 0,7]	0,08 [0,04 ; 0,14]	0,39 [0,27 ; 0,57]	1,02 [0,66 ; 2,03]
18-44 ans (341)	0,59 [0,54 ; 0,64]	0,03 [0,02 ; 0,04]	0,41 [0,37 ; 0,45]	1,33 [1,16 ; 1,52]
45-64 ans (582)	1,46 [1,33 ; 1,64]	0,13 [0,1 ; 0,16]	0,96 [0,87 ; 1,04]	3,12 [2,77 ; 3,52]
65-79 ans (239)	1,46 [1,23 ; 1,83]	0,15 [0,09 ; 0,19]	0,92 [0,8 ; 1,06]	3,4 [2,65 ; 4,42]

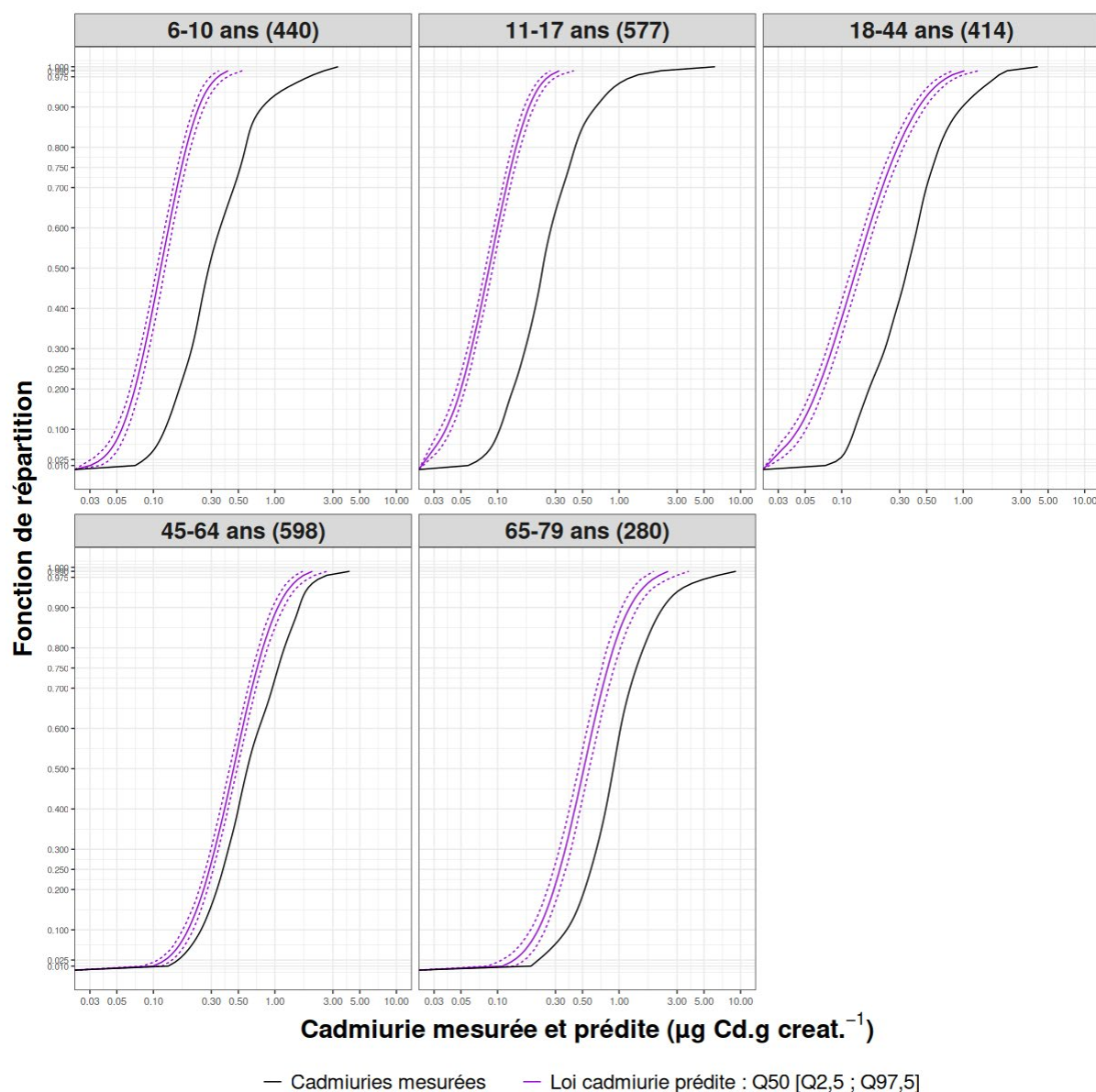


Figure 18. Fonction de répartition de la cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban (noir), et de la cadmiurie prédite (rose) avec intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5], par classe d'âge, pour la population générale non fumeuse française.

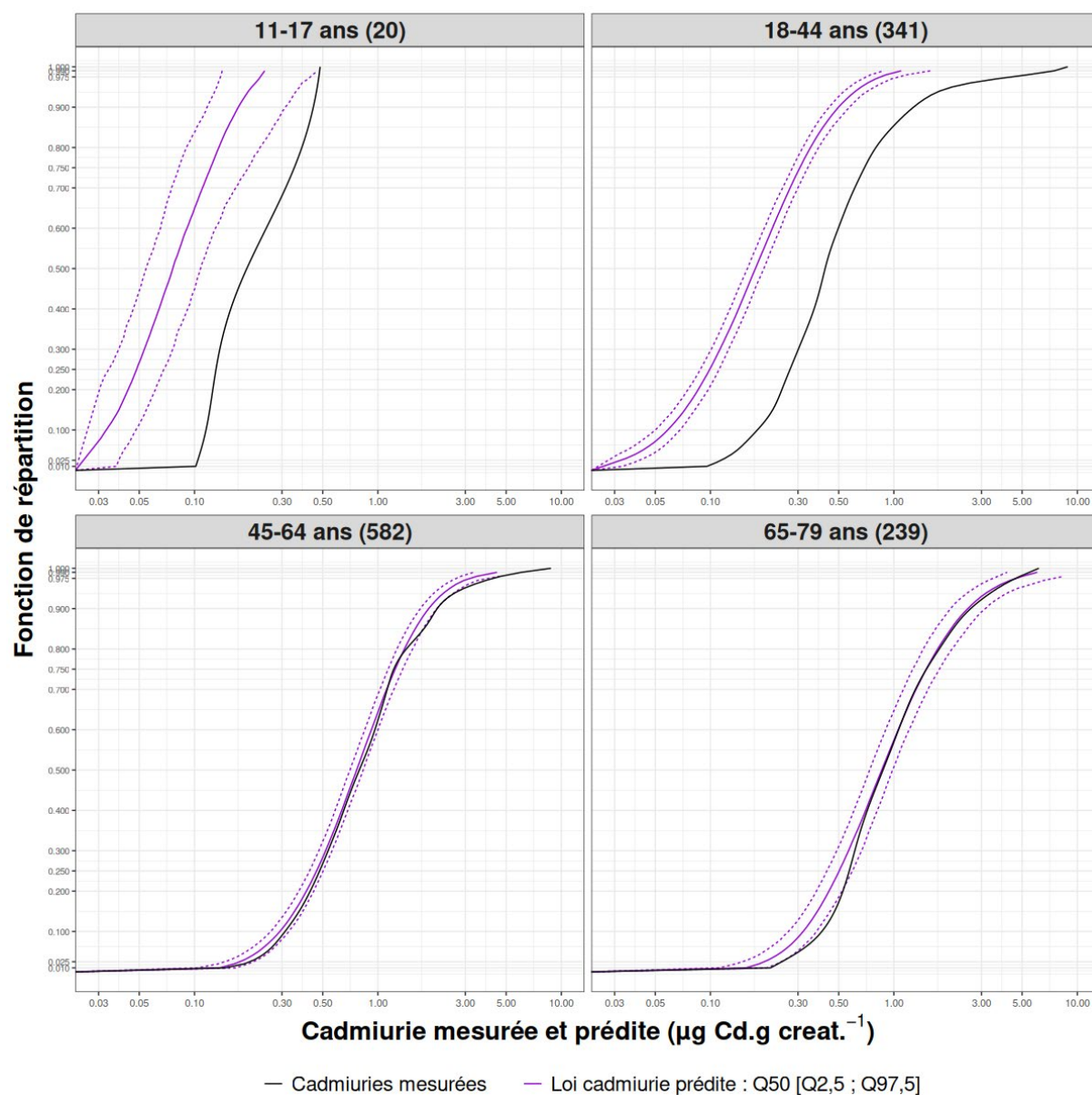


Figure 19. Fonction de répartition de la cadmiurie mesurée dans l'étude Esteban (noir), et de la cadmiurie prédite (rose) avec intervalle d'incertitude à 95% [Q2,5 ; Q97,5], par classe d'âge, pour la population générale fumeuse française.

Ces résultats sont également confirmés dans la **Figure 18** et la **Figure 19** qui présentent les fonctions de répartitions par classe d'âge des cadmiuries prédites et mesurées dans l'étude Esteban pour la population des non-fumeurs et fumeurs, respectivement. Ainsi, ces figures montrent que les distributions des données prédites par le modèle sont cohérentes avec les distributions des données mesurées dans la population de l'étude Esteban pour les individus fumeurs de plus de 45 ans. Par contre, le modèle sous-estime l'exposition pour les autres classes d'âges, en particulier celles des non-fumeurs et des enfants.

Une telle sous-estimation a déjà été mentionnée dans la littérature pour ce type de modèle (Béchaux et al. 2014 ; Vanacker et al. 2020, Lamon et al. 2025). Plusieurs incertitudes peuvent expliquer cette sous-estimation des expositions par le modèle. D'une part, le modèle combine des données issues d'enquêtes distinctes, portant sur des individus de différentes populations, avec des temporalités et des méthodes de quantification différentes. D'autre part, les cadmiuries prédites ont été ensuite comparées à celles observées dans la population de l'étude Esteban, également différentes. Ainsi, le modèle ne peut donc reproduire finement les imprégnations. De plus, certaines sources d'exposition au cadmium n'ont pu être intégrées, faute de données ou d'identification, telles que le tabagisme passif, certains produits cosmétiques, les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, ou encore les activités professionnelles exposant au cadmium pour les adultes. Pour certains paramètres d'entrée du modèle (par exemple durée d'exposition aux poussières intérieures, nombre de cigarettes par jour), seules des valeurs ponctuelles ont pu être utilisées, limitant la caractérisation de leur variabilité. Aussi, il n'a pas été possible d'intégrer l'ensemble de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués. Il est également souligné qu'au cours de ces dernières décennies, la contamination par le cadmium a évolué (Béchaux et al. 2014). Même si le modèle de trajectoire d'exposition prend en compte plusieurs enquêtes alimentaires conduites au cours du temps et certains facteurs environnementaux (sol, poussières...), il ne peut pas reproduire parfaitement cette évolution.

Pour les enfants, la sous-estimation de la cadmiurie prédite pourrait être liée à l'incertitude autour de la charge en cadmium à la naissance, ou encore à l'absence de prise en compte du tabagisme de la mère, qui n'est pas intégré dans le modèle.

D'autres incertitudes, décrites dans le chapitre 8 du rapport et liées au manque de connaissances et de données, peuvent également expliquer les écarts observés entre les cadmiuries prédites et mesurées dans la population de l'étude Esteban. Dans le futur, certaines de ces incertitudes pourraient être réduites et la variabilité mieux caractérisée.

In fine, les résultats indiquent une bonne adéquation entre les distributions d'expositions prédites et observées des individus fumeurs de plus de 45 ans. Pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs prédites par le modèle sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés.

Néanmoins, adaptée à la complexité et aux incertitudes inhérentes aux données, l'approche développée dans cette expertise est un support à l'amélioration de la compréhension des sources d'exposition à l'imprégnation au cadmium et a permis d'orienter les priorités d'action.

5.3.2.2 Identification de la population présentant un risque de dépassement de la VTR et des contributions des sources et voies

Les **Figure 20**, **Figure 21**, **Figure 22** représentent sous forme d'histogramme en 2025 la cadmiurie moyenne prédite en $\mu\text{g Cd.g}^{-1}$ de créatinine par classe d'âge, le pourcentage de contribution des couples source-voie d'exposition, pour respectivement, la population générale non fumeuse, les enfants de moins de 12 mois, et la population générale fumeuse. Les VRB par classe d'âge (représentées par la ligne en tiret), de façon à ne pas dépasser la VTR interne à l'âge de 60 ans (représentée en trait plein), permettent d'observer que dès la naissance, les imprégnations moyennes simulées à partir de différentes sources et voies d'exposition dépassent la VRB. Pour rappel, les résultats modélisés sous-estiment la cadmiurie. Cette comparaison indique à l'échelle populationnelle une possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé. La source expliquant majoritairement l'imprégnation en cadmium est la source alimentaire pour l'ensemble des classes d'âge, suivi pour les enfants de moins de 7 mois d'une contribution non négligeable de l'ingestion de poussière et de sol. L'imprégnation prénatale est une source importante de l'imprégnation des 0-6mois. Pour la population des fumeurs, l'exposition via la consommation de cigarettes est une autre source importante d'exposition.

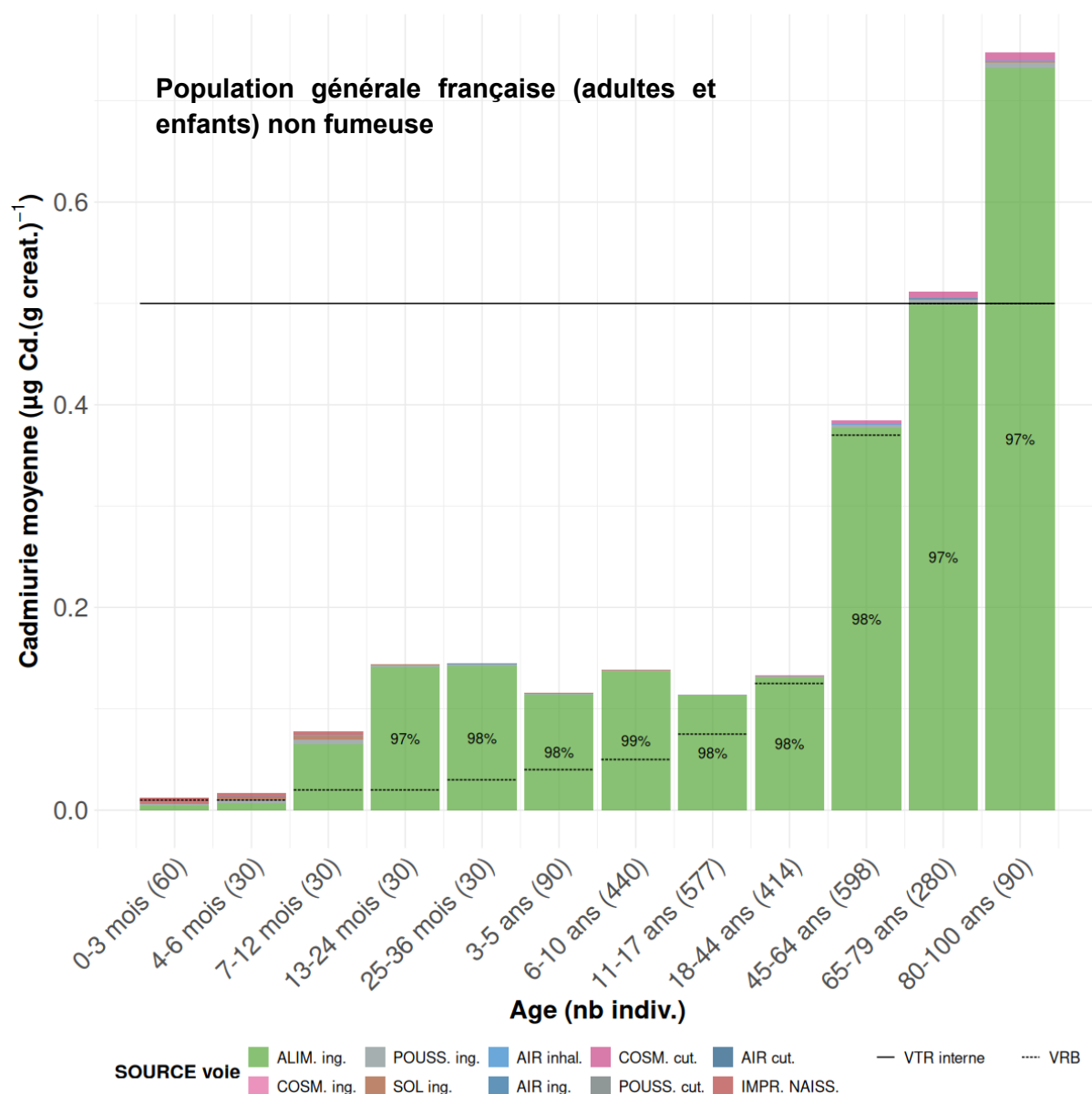


Figure 20. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale non fumeuse par classe d'âge et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 populations simulées). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; COSM cut. : exposition par contact cutané aux cosmétiques ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM₁₀ de l'air intérieur et extérieur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM₁₀ de l'air intérieur et extérieur ; COSM ing. : exposition par ingestion de produits cosmétiques ; POUSS cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM₁₀ de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la **valeur repère biologique**, (VRB) pour la classe d'âge considérée. La ligne pleine noire indique la **valeur toxicologique de référence interne** (VTR interne).

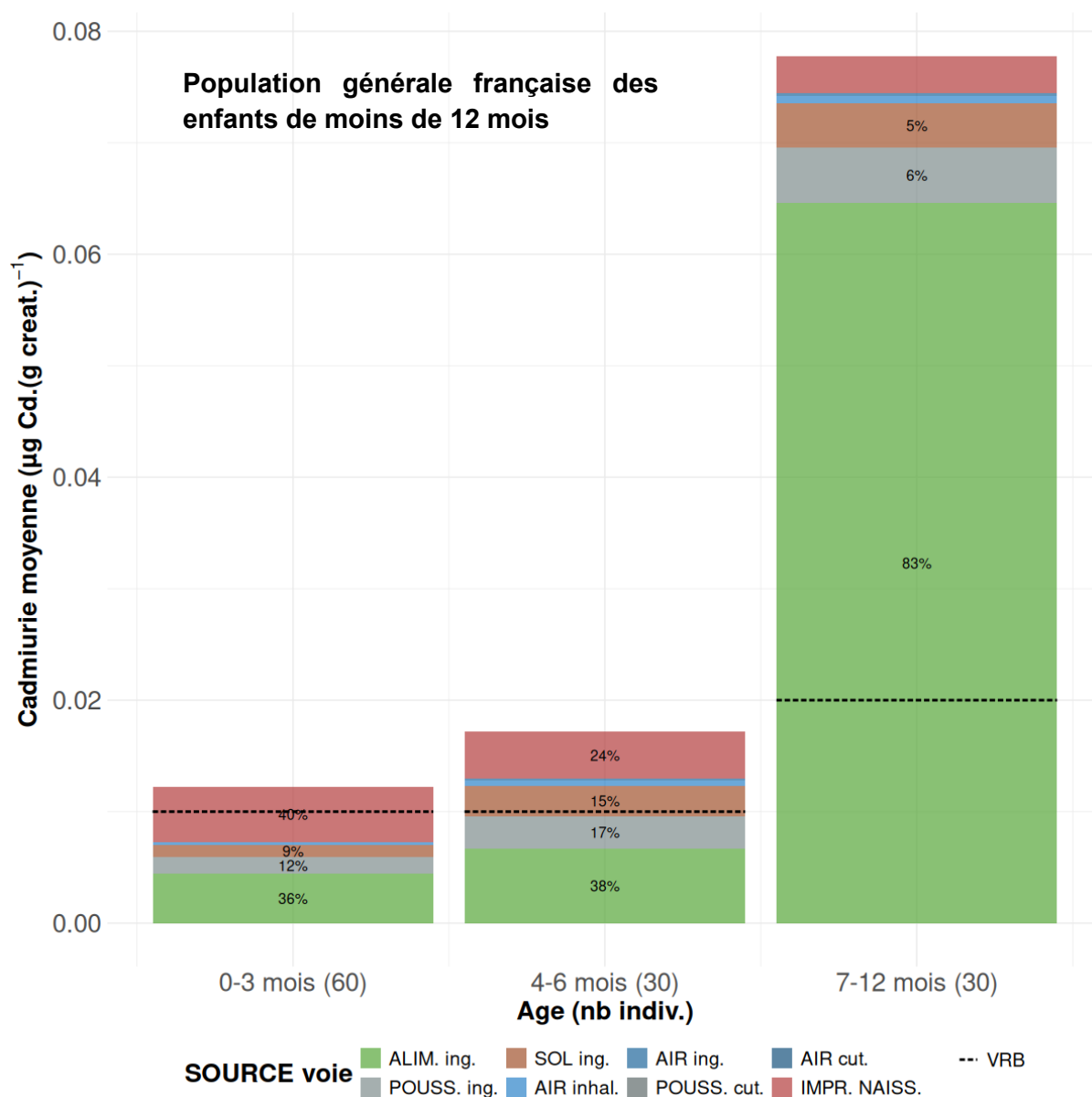


Figure 21. Cadmiurie moyenne prédite des enfants de moins de 12 mois par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 populations simulées). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : Exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; POUSS cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la **valeur repère biologique** (VRB) pour la classe d'âge considérée.

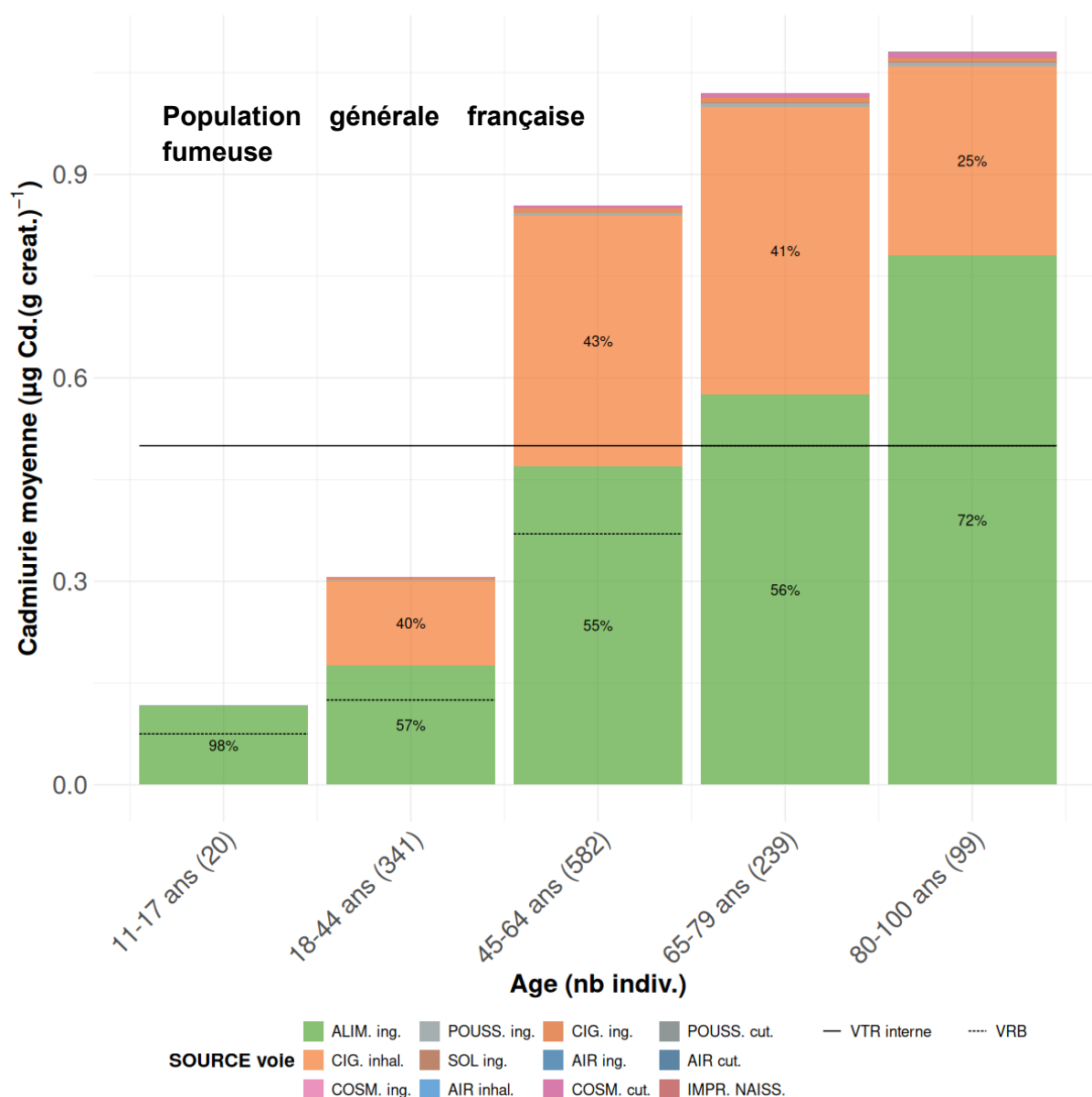


Figure 22. Cadmiurie moyenne prédite de la population générale française⁴⁶ fumeuse par classe d'âge, et contribution moyenne (en %) des couples source-voie en 2025. L'imprégnation (cadmiurie) et les contributions moyennes sont représentées par leurs médianes (calculées à partir des 1000 jeux de données). Chacun des couples source-voie est représenté par une zone colorée : ALIM. ing. : exposition par ingestion d'aliment ; CIG. Inhal : inhalation de fumée de cigarette par le fumeur ; COSM cut. : exposition par contact cutané aux cosmétiques ; POUSS. ing. : exposition par ingestion de poussières sédimentées en milieu intérieur ; SOL ing. : Exposition par ingestion de particules de sol ; AIR inhal. : exposition par inhalation de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; CIG. ing. : ingestion de fumée de cigarette par le fumeur ; AIR ing. : exposition par ingestion de PM10 de l'air intérieur et extérieur ; COSM ing. : exposition par ingestion de produits cosmétiques ; POUSS cut. : exposition par contact cutané avec les poussières sédimentées en milieu intérieur ; AIR cut. : exposition par contact cutané aux PM10 de l'air intérieur et extérieur ; IMPR. NAISS. : imprégnation prénatale. La ligne en pointillés noirs représente la **valeur repère biologique**, (VRB) pour la classe d'âge considérée. La ligne pleine noire indique la **valeur toxicologique de référence interne** (VTR interne).

⁴⁶ Les catégories d'âge de la population fumeuse présentées sur la Figure 22 sont issues de l'étude Esteban.

5.3.2.2.1 Identification de la population présentant un risque de dépassement de la VTR

Les résultats dans le **Tableau 13** montrent une cadmiurie augmentant avec l'âge de la population, en lien avec le potentiel bioaccumulable du cadmium et la chronicité des expositions actuelles sur la vie entière. Ils indiquent qu'une part de la population est à risque, avec une imprégnation au cadmium préoccupante à tout âge et cela dès le plus jeune âge. Les cadmiuries estimées par tranche d'âge en 2025 présentent des niveaux dépassant les VRB fixées par classe d'âge, pour une fraction de la population française fumeuse et non fumeuse, dont les nourrissons (à titre indicatif : de 33% des 0-3 mois à 100% pour les 25-36 mois) et les adultes (49 % des 18-44 ans, 59% des 45-64 ans et 54 % des 65-79 ans) (**Tableau 13**).

En tenant compte de leur consommation tabagique actuelle et(ou) passée et sans considérer le tabagisme passif, une cadmiurie plus élevée est observée chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs, avec des niveaux presque doublés à partir de 45 ans (**Tableau 15**). En effet, les fumeurs présentent une cadmiurie moyenne environ deux fois plus élevée que celle des non-fumeurs : pour la tranche d'âge 45–64 ans, elle atteint $0,85 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine contre $0,38 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ chez les non-fumeurs, et pour les 65–79 ans, elle s'élève à $1 \mu\text{g Cd g}^{-1}$ contre $0,51 \mu\text{g Cd g}^{-1}$. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude Esteban (Oleko et al. 2021), qui rapportent une imprégnation augmentée de 53,6 % chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs. Il est de plus observé que la proportion d'individus dépassant les VRB par classe d'âge chez les fumeurs est plus élevée que dans la population générale non-fumeuse, soit 71 % pour les 18-44 ans et 76 % pour les 45-64 ans chez les fumeurs, contre 29 % pour les 18-44 ans et 42% pour les 45-64 ans chez les non-fumeurs (**Tableau 14** et **Tableau 15**). Le tabagisme est confirmé comme un facteur d'exposition aggravant, augmentant la cadmiurie et favorisant le dépassement des VRB.

Aux niveaux d'exposition actuels, de tels dépassements indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé. Ces résultats du modèle confirment et complètent les mesures précédemment obtenues dans les évaluations de l'Anses effectuées à partir des expositions alimentaires des EAT qui concluent à l'existence d'un risque lié à l'exposition au cadmium dans la population, et celles de Santé publique France établies à partir des imprégnations mesurées dans l'étude Esteban qui montre des dépassements de valeurs guides sanitaires pour près de la moitié de la population adulte française. Il en ressort une nécessité de prioriser des options d'action pour limiter l'imprégnation humaine au cadmium, en particulier au regard de son accumulation dans l'organisme au cours de la vie.

Tableau 13. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale incluant les fumeurs et les non-fumeurs. L'absence de dépassement de la VRB implique l'absence de dépassement de la VTR interne de 0,5 µg Cd g⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans.

Classe d'âge	Valeur repère biologique (VRB) (µg Cd g ⁻¹ de créatinine)	Valeur d'imprégnation moyenne prédite (µg Cd g ⁻¹ de créatinine) Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)] :	Pourcentage de dépassement de la VRB Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)]
0-3 mois	0,01	0,012 [0,0078 ; 0,018]	33 [20 ; 46]
4-6 mois	0,01	0,017 [0,0087 ; 0,031]	37 [21 ; 53]
7-12 mois	0,02	0,078 [0,044 ; 0,15]	68 [51 ; 84]
13-24 mois	0,02	0,14 [0,11 ; 0,19]	97 [90 ; 100]
25-36 mois	0,03	0,14 [0,11 ; 0,18]	100 [93 ; 100]
3-5 ans	0,04	0,12 [0,1 ; 0,13]	92 [87 ; 98]
6-10 ans	0,06	0,14 [0,13 ; 0,15]	94 [90 ; 96]
11-17 ans	0,09	0,11 [0,11 ; 0,12]	72 [68 ; 77]
18-44 ans	0,19	0,21 [0,2 ; 0,23]	49 [45 ; 52]
45-64 ans	0,46	0,63 [0,59 ; 0,69]	59 [56 ; 62]
65-79 ans	0,5	0,75 [0,68 ; 0,83]	54 [49 ; 60]
80-100 ans	0,5	0,93 [0,82 ; 1]	75 [68 ; 81]

Tableau 14. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale des non-fumeurs. L'absence de dépassement de la VRB implique l'absence de dépassement de la VTR interne de 0,5 µg Cd g⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans.

Classe d'âge	Valeur repère biologique (VRB) (µg Cd.g ⁻¹ de créatinine)	Valeur d'imprégnation moyenne prédite (µg Cd.g ⁻¹ de créatinine) Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)] :	Pourcentage de dépassement de la VRB Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)]
0-3 mois	0,01	0,012 [0,0078 ; 0,018]	33 [20 ; 46]
4-6 mois	0,01	0,017 [0,0087 ; 0,031]	37 [21 ; 53]
7-12 mois	0,02	0,078 [0,044 ; 0,15]	68 [51 ; 84]
13-24 mois	0,02	0,14 [0,11 ; 0,19]	97 [90 ; 100]
25-36 mois	0,03	0,14 [0,11 ; 0,18]	100 [93 ; 100]
3-5 ans	0,04	0,12 [0,1 ; 0,13]	92 [87 ; 98]
6-10 ans	0,06	0,14 [0,13 ; 0,15]	94 [90 ; 96]
11-17 ans	0,09	0,11 [0,11 ; 0,12]	72 [68 ; 76]
18-44 ans	0,19	0,13 [0,13 ; 0,14]	29 [24 ; 34]
45-64 ans	0,46	0,38 [0,36 ; 0,41]	42 [37 ; 46]
65-79 ans	0,5	0,51 [0,46 ; 0,56]	41 [33 ; 48]
80-100 ans	0,5	0,75 [0,64 ; 0,88]	65 [52 ; 76]

Tableau 15. Imprégnation moyenne prédite et pourcentage de dépassement des valeurs repères biologiques (VRB) par classe d'âge, dans la population générale incluant des fumeurs. L'absence de dépassement de la VRB implique l'absence de dépassement de la VTR interne de 0,5 µg Cd g⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans.

Classe d'âge	Valeur repère biologique (VRB) (µg Cd.g ⁻¹ de créatinine)	Valeur d'imprégnation moyenne prédite (µg Cd.g ⁻¹ de créatinine) Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)] :	Pourcentage de dépassement de la VRB Q(50) [Q(2.5) ; Q(97.5)]
11-17 ans	0,09	0,12 [0,091 ; 0,15]	75 [54 ; 93]
18-44 ans	0,19	0,31 [0,28 ; 0,34]	71 [66 ; 76]
45-64 ans	0,46	0,85 [0,79 ; 0,97]	76 [71 ; 79]
65-79 ans	0,5	1 [0,89 ; 1,2]	70 [61 ; 78]
80-100 ans	0,5	1,1 [0,92 ; 1,3]	84 [74 ; 92]

5.3.2.2.2 Caractérisation de la contribution des sources et voies d'exposition à l'imprégnation

L'analyse des contributions respectives des différentes sources et voies d'exposition au cadmium, illustrée dans les **Figure 20**, **Figure 21** et **Figure 22**, a permis de mieux décrire l'évolution de l'imprégnation humaine au cours de la vie.

Pour la population générale non-fumeuse, l'ingestion d'aliments constitue la source majeure d'imprégnation humaine au cadmium (Figure 21). Dès l'âge de 12 mois, cette source d'exposition explique plus de 90 % de la contribution, atteignant 98% à partir de 6 ans puis au cours de la vie, à l'imprégnation humaine au cadmium. Jusqu'à l'âge de 17 ans, l'imprégnation au cadmium peut paraître moindre et relativement constante. La constance de l'imprégnation avant l'âge adulte peut vraisemblablement être liée au fait que l'excrétion de la créatinine augmente avec l'âge et compense le processus d'accumulation. Au-delà de 18 ans, il est observé une augmentation de l'imprégnation, particulièrement marquée chez les individus à partir de 45 ans. La hausse de cadmiurie observée après 18 ans reflète la cinétique d'accumulation du cadmium dans l'organisme. Hors alimentation, la contribution des autres sources d'exposition au cadmium relatives à l'ingestion ou le contact cutané avec les poussières, le sol, les produits cosmétiques, ainsi que l'inhalation ou l'ingestion de particules fines (PM10) présentes dans l'air intérieur et extérieur, restent très mineures en contribuant ensemble à moins de 2% de l'imprégnation humaine.

Pour la **population infantile de moins de 12 mois (Figure 21)**, l'imprégnation en cadmium résultant d'une exposition *in utero* (simulée en tenant compte des teneurs en cadmium observées dans le sang de cordon ombilical) explique une première source caractérisant l'imprégnation au cadmium dès les premiers mois de la vie. Cette source contribue à hauteur de 40 % de l'imprégnation humaine au cadmium dès les trois premiers mois de vie et diminue à 24 % de 3 à 6 mois de vie. Le placenta exerce une fonction reconnue de barrière vis-à-vis du cadmium (EFSA, 2009 ; ATSDR, 2012). Celui-ci s'accumule préférentiellement dans les tissus placentaires, qui jouent ainsi un rôle protecteur vis-à-vis du fœtus. Toutefois, l'efficacité de cette barrière reste limitée, et le transfert transplacentaire n'est pas totalement exclu. L'étude de Pesce et al. (2021) a mis en évidence la présence de cadmium dans le sang de cordon ombilical, attestant de ce passage, qui a été pris en compte dans les estimations réalisées dans la présente expertise.

L'exposition prénatale au cadmium explique ainsi une contribution significative à l'imprégnation totale observée en début de vie, pouvant atteindre 40% de la charge corporelle au cours des trois premiers mois. Plusieurs études épidémiologiques suggèrent par ailleurs qu'une exposition, même faible, au cadmium durant la période fœtale et la petite enfance est associée à des effets neurodéveloppementaux (Ciesielski et al. 2012, Kippler et al. 2012, Rodriguez et al. 2014, Jeong et al. 2015, Gustin et al. 2018) ainsi qu'à des altérations du développement staturo-pondéral (diminution de la taille et du poids à la naissance, du périmètre crânien, troubles du métabolisme osseux) (Bhattachariyya.2009, Sughis, 2011, Kippler et al. 2012, Gardner. 2013, Sun. 2014, Liu et al, 2019, Khoshhali et al, 2020) (Anses. 2016, 2019).

L'exposition prénatale constitue une fenêtre de sensibilité particulière vis à vis des effets sur le développement.

Il est ensuite observé que cette source s'estompe au cours de la vie au profit des autres sources d'exposition. Chez les enfants de moins de 12 mois, l'ingestion d'aliments explique une source contributrice importante à l'imprégnation, représentant une proportion de 36% pour les 0-3 mois, 38% pour les 4-6 mois et 83% pour les 7-12 mois. Cette contribution augmente au fur et à mesure de l'introduction de la diversification alimentaire, la contribution des autres sources de cadmium se réduisant. Néanmoins, l'ingestion de poussières et de sols constituent d'autres sources importantes d'imprégnation des enfants de moins de 12 mois, représentant d'une part, pour l'ingestion de poussières, une proportion de 12 % pour les 0-3 mois, 17 % pour les 4-6 mois et diminuant à 6 % pour les 7-12 mois, et d'autre part, pour l'ingestion de sols, une proportion de 9 % pour les 0-3 mois, 15 % pour les 4-6 mois et diminuant à 5% pour les 7-12 mois. Chez les enfants de 0 à 12 mois, une contribution de l'ingestion de sol est observée dès les premiers mois de vie, notamment avant 6 mois. Une hypothèse avancée pour expliquer cette exposition précoce est le contact étroit avec les adultes ou les surfaces contaminées, qui pourrait contribuer indirectement à l'exposition des très jeunes enfants.

Concernant la **population générale fumeuse**, qui pour rappel inclut la consommation de tabac des fumeurs actuels et passés mais pas le tabagisme passif, son niveau de cadmiurie est augmenté par rapport à celui des non-fumeurs (**Figure 22**). Chez les fumeurs, l'inhalation de fumée de tabac est une autre source importante d'exposition. La source tabagique contribue à l'imprégnation particulièrement pour les individus à partir de la quarantaine. Chez les 45-64 ans, elle peut représenter jusqu'à 43 % de l'imprégnation, tandis que l'alimentation reste la principale source avec une contribution allant jusqu'à 55 %. Ces résultats soulignent que le tabagisme constitue un facteur d'exposition supplémentaire et contribue à l'imprégnation humaine au cadmium à partir de la quarantaine.

En conclusion, les résultats indiquent qu'une part de la population est à risque (avec des résultats modélisés sous-estimant la cadmiurie), avec une imprégnation au cadmium préoccupante à tout âge et cela dès le plus jeune âge. Aux niveaux d'expositions actuels, et s'ils se maintiennent dans le temps, de tels dépassements des valeurs repères biologiques indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé.

Avant l'âge de 12 mois, l'exposition provient majoritairement de l'ingestion d'aliments, bien que d'autres sources minoritaires participent également à l'imprégnation, notamment l'ingestion de poussières et de sols. L'exposition prénatale au cadmium — bien que partiellement limitée par la barrière placentaire — se poursuit *post partum* ; l'imprégnation est significative pendant les six premiers mois de vie. Cette exposition

prénatale explique jusqu'à 40% de l'imprégnation observée sur les trois premiers mois de vie, et diminue à 24% entre 3 et 6 mois, du fait de l'exposition à de nouvelles sources. L'exposition prénatale constitue une fenêtre de sensibilité particulière vis à vis des effets sur le développement (Anses, 2019a).

À partir de 12 mois et jusqu'à 18 ans et à l'âge adulte, l'alimentation est la source majeure d'exposition et explique jusqu'à 98 % de l'imprégnation au cadmium.

Rien que par l'alimentation, les niveaux de cadmiuries dépassent déjà les valeurs repères biologiques selon les classes d'âge, laissant peu de marge à d'autres sources d'exposition. Chez les fumeurs, le tabac apparaît comme une autre source importante, pouvant contribuer jusqu'à 43 % de l'imprégnation totale, tandis que l'alimentation reste la principale source avec une contribution allant jusqu'à 55 %. Le tabagisme est confirmé comme un facteur d'exposition aggravant. Néanmoins, il convient de souligner que les habitudes de consommation alimentaire des fumeurs peuvent différer de celles des non-fumeurs, ce qui n'a pas été pris en compte dans ces estimations et ce qui peut constituer une source d'incertitude. Toutefois, l'analyse des déterminants sociodémographiques de l'exposition alimentaire n'a pas mis en évidence d'effet significatif du tabagisme sur cette exposition. Aucune corrélation n'a été observée entre l'exposition alimentaire au cadmium et le statut tabagique dans les appariements réalisés entre les jeux de données.

Enfin, il convient de rappeler que certaines sources d'exposition au cadmium n'ont pu être intégrées, faute de données ou d'identification, telles que le tabagisme passif, certains produits cosmétiques, les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, ou encore les activités professionnelles exposant au cadmium. Aussi, il n'a pas été possible d'intégrer l'ensemble de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués.

5.3.2.3 Identification des groupes d'aliments les plus contributeurs à l'imprégnation humaine au cadmium

L'alimentation est identifiée comme la source majeure de l'imprégnation humaine au cadmium tout au long de la vie au sein de la population générale française. Afin de caractériser les aliments contribuant majoritairement à cette imprégnation en vue d'identifier des options d'action pertinentes (cf. **chapitres 6 et 7**), la **Figure 23** présente, par classe d'âge, les groupes d'aliments les plus contributeurs à l'imprégnation humaine au cadmium. La **Figure 24** apporte un zoom sur la présentation de la part (en %) des groupes de denrées constituant la catégorie « Autres groupes d'aliments » de la **Figure 23**.

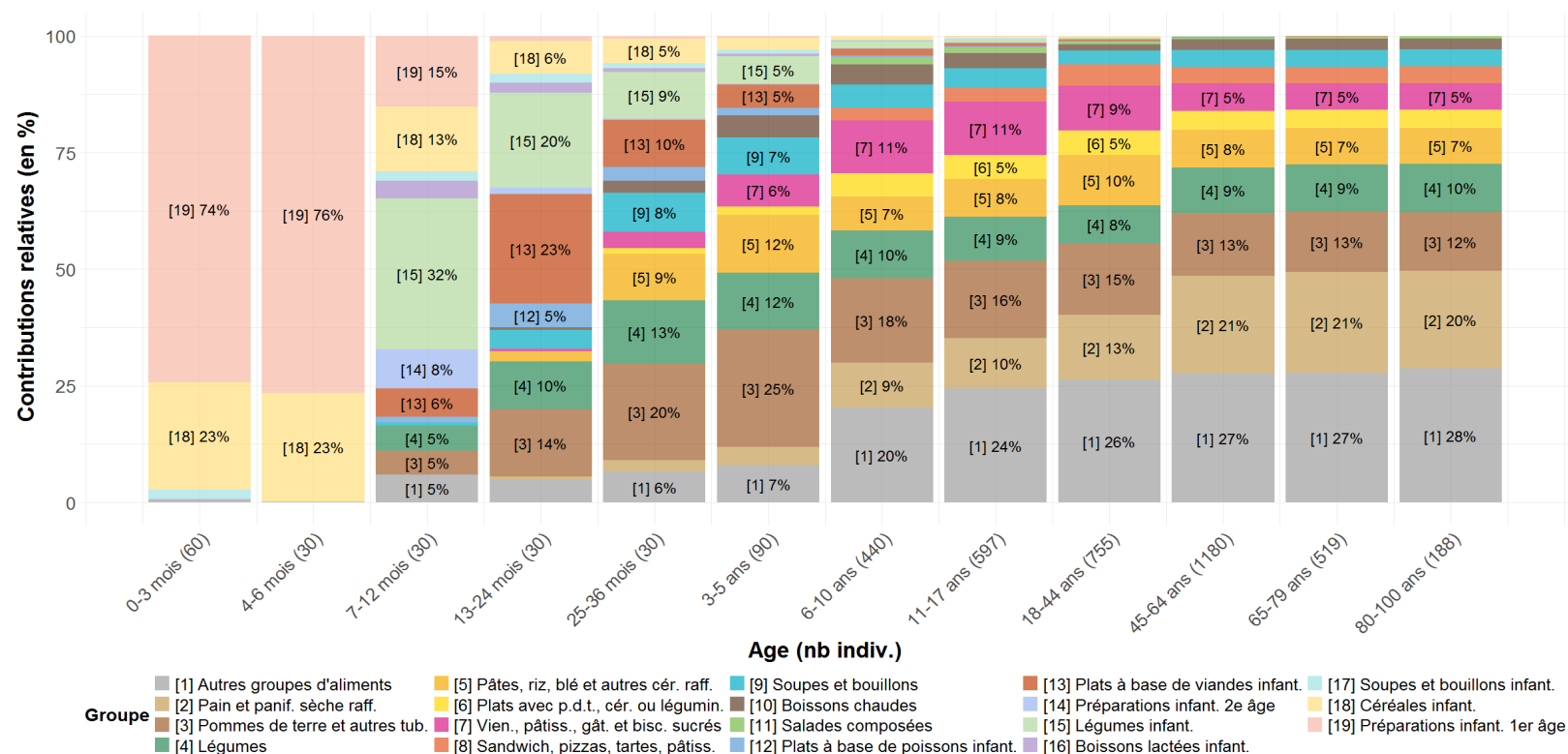


Figure 23. Contribution moyenne (en %) des groupes d'aliments à l'imprégnation au cadmium, par classe d'âge pour la population générale française. Les pourcentages dans les barres sont les contributions moyennes relatives des groupes d'aliments. La contribution moyenne est représentée par sa médiane (calculées à partir des 1000 jeux de données). Seules les contributions moyennes supérieures à 5% sont indiquées par leur valeur. A chaque groupe d'aliments est associée une couleur et un nombre. Les groupes d'aliments sont les suivants : [2] 'Pain et panification sèche raffinés', [3] 'Pommes de terre et autres tubercules', [4] 'Légumes', [5] 'Pâtes, riz, blé et autres céréales raffinées', [6] 'Plats à base de pommes de terre, de céréales ou de légumineuses', [7] 'Viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés', [8] 'Sandwich, pizzas, tartes, pâtisseries', [9] 'Soupes et bouillons', [10] 'Boissons chaudes', [11] 'Salades composées', [12] 'Plats infantiles à base de poissons', [13] 'Plats infantiles à base de viandes', [14] 'Préparations infantiles 2ème âge', [15] 'Légumes infantiles', [16] 'Boissons lactées infantiles', [17] 'Soupes et bouillons infantiles', [18] 'Céréales infantiles', [19] 'Préparations infantiles 1er âge' et [1] 'Autres groupes d'aliments'. 'Autres groupes d'aliments' contient tous les groupes d'aliments exclus de la liste précédente et contribuant pour chacun à moins de 5% à l'imprégnation comme illustré en **Figure 24**.

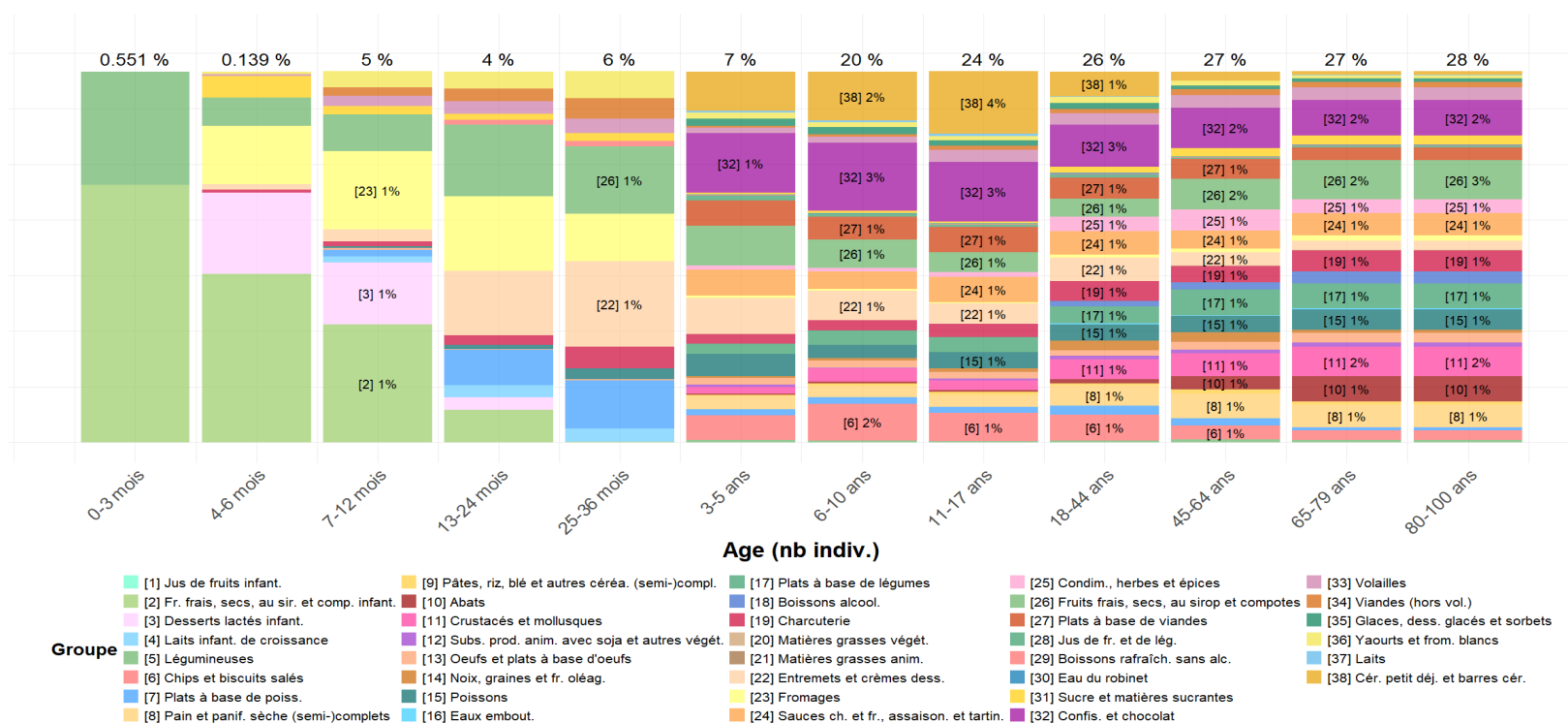


Figure 24. Contribution moyenne (en %) à l'exposition externe (approximation de cadmiurie) au cadmium des groupes d'aliments inclus dans la catégorie 'Autres groupes d'aliments', par classe d'âge et pour la population générale française. Les pourcentages dans les barres sont les contributions moyennes des groupes d'aliments inclus dans la catégorie 'Autres groupes d'aliments' de la Figure 23. La valeur de la contribution totale de ces groupes d'aliments est rappelée en tête de colonne. Seules les contributions moyennes supérieures ou égales à 1% sont indiquées par leur valeur. A chaque groupe d'aliments est associée une couleur et un nombre. Les groupes d'aliments sont les suivants : [1] 'Jus de fruits infantiles', [2] 'Fruits frais, secs, au sirop et compotes infantiles', [3] 'Desserts lactés infantiles', [4] 'Laits infant. de croissance', [5] 'Légumineuses', [6] 'Chips et biscuits salés', [7] 'Plats à base de poissons', [8] 'Pain et panification sèche complets ou semi-complets', [9] 'Pâtes, riz, blé et autres céréales complètes et semi-complètes', [10] 'Abats', [11] 'Crustacés et mollusques', [12] 'Substituts de produits animaux à base de soja et autres végétaux', [13] 'Oeufs et plats à base d'œufs', [14] 'Noix, graines et fruits oléagineux', [15] 'Poissons', [16] 'Eaux embouteillées', [17] 'Plats à base de légumes', [18] 'Boissons alcoolisées', [19] 'Charcuterie', [20] 'Matières grasses végétales', [21] 'Matières grasses animales', [22] 'Entremets et crèmes desserts', [23] 'Fromages', [24] 'Sauces chaudes et froides, assaisonnement et tartinables', [25] 'Condiments, herbes et épices', [26] 'Fruits frais, secs, au sirop et compotes', [27] 'Plats à base de viandes', [28] 'Jus de fruits et de légumes', [29] 'Boissons rafraîchissantes sans alcool (BRSA)', [30] 'Eau du robinet', [31] 'Sucre et matières sucrantes', [32] 'Confiserie et chocolat', [33] 'Volailles', [34] 'Viandes (hors volailles)', [35] 'Glaces, desserts glacés et sorbets', [36] 'Yaourts et fromages blancs', [37] 'Laits', [38] 'Céréales pour petit déjeuner et barres céréalières'.

Avant l'âge de 7 mois, les préparations infantiles 1^{er} âge sont la source alimentaire principale avec une contribution moyenne à l'imprégnation atteignant 76 %, suivies des céréales infantiles (23 %).

Chez les **enfants de 7-12 mois**, au fur et à mesure de l'introduction des aliments dans le régime alimentaire : les pots de légumes (représentant une contribution moyenne de 32%) s'ajoutent aux contributions des préparations infantiles et céréales infantiles.

Chez les enfants de 13-24 mois, les pots de légumes-viande (23%) et les pots de légumes (20%) contribuent à la part alimentaire de l'imprégnation humaine, ainsi que l'introduction d'aliments courants liés aux pommes de terre (14%) et légumes (10%).

Chez les enfants de 25 mois à 5 ans, les aliments courants contribuent de façon croissante à la part alimentaire de l'imprégnation humaine au cadmium : pommes de terre (20% - 25%), légumes (13% - 12%), pâtes, riz, blé et autres céréales raffinés (9-12%), soupes et bouillons (8% - 7%).

Chez les 6-10 ans et 11-17 ans, les pommes de terre (18% - 16% respectivement), légumes (10 % - 9 % respectivement), pâtes, riz, blé et autres céréales raffinés (7 - 8% respectivement), contribuent majoritairement à la part alimentaire de l'imprégnation humaine au cadmium. Pour ces deux classes d'âge, la consommation de pain et produits de panification sèche (9 % - 10% respectivement), et viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés (11%) s'ajoutent à la part alimentaire de l'imprégnation humaine au cadmium. Ces résultats sont cohérents avec les contributeurs identifiés dans l'étude Esteban, la consommation des céréales du petit déjeuner ressortant comme facteur de risque chez les 6 -17 ans (Oleko et al.2021).

Chez les adultes de 18 à 44 ans, 45 à 64 ans, 65 à 79 ans, 80-100 ans, les mêmes groupes de denrées identifiés comme contributeurs majeurs dans la part alimentaire à l'imprégnation au cadmium chez les enfants et adolescents (6 à 17 ans) sont observés. Il est notamment remarqué une contribution importante de certains groupes de denrées en fonction de l'âge concernant : le pain et produits de panification sèche (13% - 21% - 21% - 20% respectivement), suivi des pommes de terre (15% - 13% - 13% - 12% respectivement), légumes (8% - 9% - 9% - 10% respectivement), pâtes, riz, blé et autres céréales raffinés (10% - 8% - 7% - 7% respectivement), et viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés (9% - 5% - 5% - 5% respectivement). A eux seuls, ces groupes de denrées contribuent à plus de la moitié de la part de la source alimentaire à l'imprégnation humaine (jusqu'à 55% chez les 18-44 ans, 45-64 ans, et 65-79 ans).

Il est noté que la concentration en cadmium a augmenté pour 28 % des aliments, dans l'EAT3 par rapport à l'EAT2 notamment pour les pommes de terre et certains produits céréaliers, en particulier pour les céréales pour petit déjeuner avec une augmentation d'un facteur 3,5 (Anses, 2026).

Les résultats de la présente expertise indiquent que, chez l'enfant à partir de 5 ans comme chez l'adulte, la contribution de la catégorie « chocolat et confiserie » ne dépasse pas 3 % de l'exposition totale de l'alimentation. La **Figure 24** l'illustre ; elle présente la part (en %) des groupes de denrées constituant la catégorie « Autres groupes d'aliments » de la **Figure 23**, chacun expliquant moins de 5 % de l'imprégnation par classe d'âge dans la population, catégorie au sein de laquelle figure le chocolat.

Les experts ont toutefois pris note de l'attention portée par les instances internationales concernant la contamination du cacao par le cadmium (JECFA, 2023). La contribution du

cacao en tant qu'ingrédient dans les produits à base de chocolat n'a pas pu être calculée, faute de données scientifiques appropriées. Il conviendrait de mener par la suite des travaux complémentaires sur la contribution totale des produits à base de chocolat à l'exposition.

En résumé, l'étude des contributions alimentaires à l'imprégnation humaine au cadmium selon les classes d'âge met en évidence une évolution progressive des sources d'exposition en fonction des habitudes alimentaires. Chez les nourrissons de moins de 7 mois, l'imprégnation par les aliments est largement dominée par les préparations infantiles 1^{er} âge et, dans une moindre mesure, par les céréales infantiles. À partir de l'introduction de la diversification alimentaire, les pots de légumes-viande ainsi que les pots de légumes pour enfants deviennent les principaux contributeurs. À mesure que l'enfant grandit, les aliments courants remplacent progressivement les aliments infantiles comme sources principales d'imprégnation par l'alimentation. Dès 2 ans, les pommes de terre, les légumes, les produits céréaliers raffinés (pâtes, riz, blé) et les soupes deviennent des sources majeures. À partir de 6 ans et jusqu'à l'âge adulte, cette tendance se confirme avec un rôle contributeur du pain, des produits de panification sèche et des produits sucrés (viennoiseries, pâtisseries, gâteaux, biscuits), qui viennent compléter les denrées végétales déjà identifiées (pommes de terre et légumes). Chez les adultes, les mêmes groupes alimentaires restent dominants, avec une contribution particulièrement marquée du pain et des produits de panification sèche. Ces résultats soulignent l'importance des denrées végétales et des produits céréaliers raffinés dans l'exposition alimentaire au cadmium tout au long de la vie, justifiant leur prise en compte prioritaire dans les options d'action visant à réduire l'imprégnation de la population.

5.4 Conclusion sur l'agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie et analyse des déterminants des expositions pour la population générale française

L'évolution de la cadmiurie a été modélisée au cours de la vie, en tenant compte de la cinétique d'accumulation dans l'organisme et de la longue demi-vie du cadmium (cf 5.2.1), à partir des différentes sources et voies d'exposition identifiées pour la population générale française, enfants et adultes, incluant fumeurs et non-fumeurs. **Pour la première fois, le lien entre les sources d'exposition environnementales et alimentaires au cadmium et l'imprégnation humaine a été examiné.**

La mise en œuvre du modèle a nécessité, en amont, un travail conséquent de collecte de données et de calcul des expositions par source, à l'aide d'équations établies dans le cadre de ces travaux. L'agrégation des expositions s'est appuyée sur des données issues d'enquêtes diverses, combinées au sein d'une méthode reposant sur la définition d'une population cible s'appuyant sur une population de référence (Esteban) représentative de la population, ainsi que la simulation d'individus non présents dans Esteban. Des variables de stratification identifiées comme significatives lors de l'analyse des déterminants socio-démographiques ont été prises en compte dans le calcul des expositions (l'IMC, l'âge, le sexe, le diplôme, le statut tabagique, la région, l'environnement de vie rural/urbain, la taille de l'agglomération, la temporalité d'exposition).

Pour chacun des 3 949 individus de l'étude Esteban et des individus supplémentaires simulés, une trajectoire d'exposition a été modélisée depuis la naissance jusqu'à la fin de vie, pour calculer des expositions par source et voie selon des âges pivots (naissance, 1 mois, 3 mois, 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans, 6 ans, 11 ans, 15 ans, 18 ans, 30 ans, 45 ans, 65 ans et 80 ans).

Les expositions agrégées par individu ont ensuite servi de données d'entrée pour simuler l'accumulation du cadmium dans l'organisme tout au long de la vie, par l'implémentation du modèle cinétique basé sur la physiologie (PBK) du cadmium adapté de celui développé par Kjellström et Nordberg (1978), tenant compte de l'ensemble des voies d'exposition (ingestion, inhalation et cutanée) et de l'exposition au cadmium avant la naissance.

Afin de vérifier la plausibilité des scénarios d'exposition retenus, les cadmiuries simulées ont ensuite été comparées à celles mesurées dans l'étude Esteban (Oleko et al., 2021). Les résultats indiquent une bonne adéquation entre les distributions d'expositions prédites et observées des individus fumeurs de plus de 45 ans. Pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs prédites par le modèle sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés.

Néanmoins, adaptée à la complexité et aux incertitudes inhérentes aux données, l'approche développée dans cette expertise est un support à l'amélioration de la compréhension des sources d'exposition à l'imprégnation au cadmium et a permis d'orienter les priorités d'action.

La **Figure 25** rappelle de façon conceptuelle la méthodologie développée dans cette expertise.

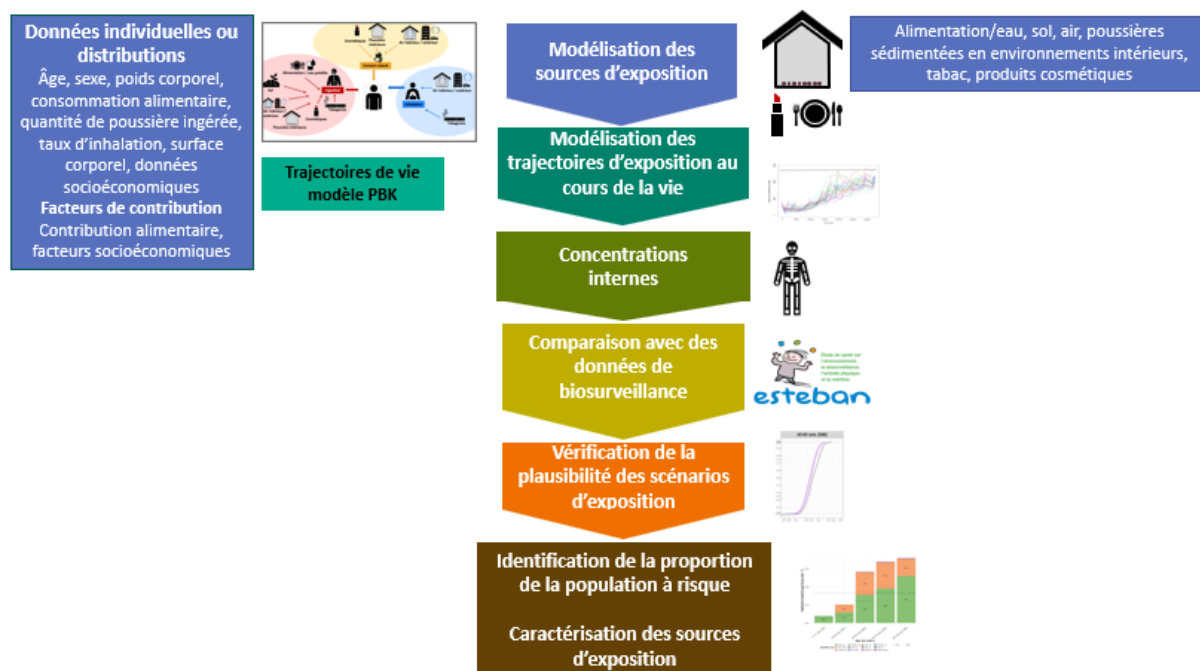


Figure 25. Schéma conceptuel de la démarche mise en œuvre

Les résultats montrent une cadmiurie augmentant avec l'âge de la population, en lien avec le potentiel bioaccumulable du cadmium et la chronicité des expositions actuelles sur la vie entière. Ils indiquent qu'une part de la population est à risque, avec une imprégnation au cadmium préoccupante à tout âge et cela dès le plus jeune âge. Aux niveaux d'exposition actuels, et s'ils se maintiennent dans le temps, de tels dépassements indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé. Ces résultats du modèle confirment et complètent les mesures précédemment obtenues dans les évaluations de l'Anses effectuées à partir des expositions alimentaires des EAT qui concluent à l'existence d'un risque lié à l'exposition au cadmium dans une partie de la population. Ces résultats confortent également ceux de Santé publique France relatifs aux imprégnations mesurées dans l'étude Esteban qui montrent des dépassements de valeurs guides sanitaires pour près de la moitié de la population adulte française.

L'alimentation est la source majeure de l'imprégnation humaine au cadmium tout au long de la vie pour la population générale. Les contributeurs majeurs à l'exposition par l'alimentation sont les pommes de terre, les produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que les légumes.

Il est noté que la concentration en cadmium a augmenté pour 28 % des aliments, dans l'EAT3 par rapport à l'EAT2 notamment pour les pommes de terre et certains produits céréaliers, en particulier pour les céréales pour petit déjeuner avec une augmentation d'un facteur 3,5.

Le tabac est identifié comme est une autre source importante de l'imprégnation humaine au cadmium pour la population générale fumeuse.

Par ailleurs, la modélisation de l'imprégnation dès la naissance, à partir des concentrations mesurées dans le sang de cordon ombilical, met en évidence une exposition prénatale significative. Celle-ci peut refléter en partie la charge corporelle accumulée chez la mère et transférée au fœtus durant la grossesse. Ces éléments renforcent la nécessité de mesures collectives ciblées pour réduire l'exposition des femmes en âge de procréer, et en particulier des femmes enceintes, afin de protéger les premières phases du développement, qui représentent des fenêtres de vulnérabilité majeures.

Toutefois, les résultats doivent être interprétés en tenant compte de certaines limites méthodologiques. Premièrement, les données disponibles sont moins nombreuses pour les sources d'exposition autres que l'alimentation (par exemple : l'air intérieur, les produits de consommation, etc), ce qui peut conduire à une sous-estimation de leur contribution réelle à l'imprégnation humaine au cadmium. Aussi, les effets du tabagisme passif n'ont pas été pris en compte, ce qui pourrait également sous-estimer l'exposition dans certaines populations, en particulier chez les enfants. Deuxièmement, la prise en compte de l'absorption cutanée s'est faite selon une hypothèse d'appliquer dans le modèle PBK un facteur d'absorption de 0,5% à la quantité d'exposition cutanée et distribuée dans le plasma. Troisièmement, l'absence de modélisation cinétique spécifique *in utero* ne permet pas d'évaluer avec précision l'exposition prénatale, ici calculée à partir des données de concentration massique de cadmium dans le sang de cordon, en l'absence de modèle placentaire. De plus, il n'a pas été considéré d'expositions spécifiques, comme celle de riverains de sites pollués en cadmium ou les expositions professionnelles, qui s'ajouteraient aux expositions prises en compte dans cette expertise.

De plus, ces travaux n'intègrent pas la consommation de tous les produits de la mer dans la réévaluation de l'exposition humaine au cadmium. En effet, même s'il est considéré un groupe de denrées alimentaires liées aux crustacés et mollusques dans les EAT, les données concernant cette catégorie alimentaire restent très parcellaires et ne tiennent pas compte de tous les produits de la mer consommés. L'étude Consomer conduite à l'Anses entre 2016 et 2017 a permis de collecter des données sur la consommation de produits de la mer au sein de la population adulte résidant dans les départements côtiers français. Il a été difficile d'apparier ces données dans le modèle d'exposition agrégée par manque de données de contamination par les EAT, sans être en capacité de pouvoir tenir compte des habitudes de consommation alimentaires différentes pour les consommateurs des produits de la mer avec des aliments moins consommés que d'autres, engendrant trop d'incertitudes dans la modélisation. Cependant, les produits de la mer (coquilles Saint Jacques, crustacés, mollusques, algues, bulots) contiennent des teneurs élevées en cadmium car ces derniers tendent à concentrer le cadmium présent dans le milieu marin (Efsa, 2009, 2012 ; Anses, 2011b, 2020a,b, 2025). Ils peuvent donc contribuer à l'exposition au cadmium par l'alimentation. Il est observé dans cette étude que pour les quelques produits de la mer composant le groupe de denrées alimentaires liées aux crustacés et mollusques, que celui-ci peut se situer généralement après les six premiers groupes de denrées contributeurs à l'imprégnation humaine par l'alimentation. Par ailleurs, l'étude Esteban souligne aussi que la consommation de crustacés, mollusques et coquillages chez les adultes français est un facteur de risque favorisant une augmentation de la cadmiurie, en observant une augmentation de 2,5 % de la cadmiurie chez ceux qui consommaient $5,2 \text{ g j}^{-1}$ de ces produits de la mer par rapport

à ceux qui en consommaient $2,0 \text{ g j}^{-1}$ (Oleko et al. ; 2021). Ces constats soulignent néanmoins que les produits de la mer doivent faire l'objet d'une attention en matière d'action.

Le **chapitre 8** développe les limites rencontrées lors de l'agrégation des sources et voies d'exposition ainsi que pour la prédiction de la cadmiurie. Ces limitations soulignent la nécessité de compléter les données et les modèles pour affiner l'estimation des sources d'exposition et mieux orienter les mesures de prévention.

En conclusion, les trajectoires d'exposition au cours de la vie ont été modélisées pour la population générale française. Malgré les limites identifiées, il en ressort clairement que l'alimentation explique l'imprégnation humaine au cadmium pour la population générale enfants et adultes, suivie, pour les fumeurs du tabagisme. Ces constats soulignent la nécessité de renforcer les mesures sur ces sources, en particulier sur les groupes de denrées identifiés comme contributeurs majeurs (pommes de terre, produits céréaliers, légumes) et sur la réduction du tabagisme. Ces résultats constituent un support scientifique à l'analyse socio-économique visant à identifier des options d'action envisageables afin de réduire l'imprégnation humaine au cadmium, dont l'étude est présentée dans les chapitres 6 et 7.

En perspective, cette étude pourrait être utilement complétée par des simulations visant à identifier la performance de leviers d'action ciblant les principales sources contributrices et un travail de décomposition des aliments contributeurs en ingrédients pour remonter aux filières, afin de viser une réduction mesurable de l'imprégnation humaine au cadmium. Ces simulations n'ont cependant pas pu être menées dans le cadre de cette expertise, en raison des délais impartis. Par ailleurs, des synergies pourraient être envisagées avec le modèle « source-to-dose » (de la source d'apport en cadmium dans le sol jusqu'à l'aliment tel que consommé) développé par l'Anses (2019) et par Carne et al. (2021), pour affiner le lien entre les imprégnations humaines et leurs sources environnementales, agricoles et alimentaires. Une telle approche permettrait de progresser vers une évaluation du fardeau sanitaire global tenant compte de toutes les voies d'exposition afin d'évaluer les conséquences de l'exposition au cadmium sur la santé de la population. Une telle estimation, assortie d'une analyse socio-économique intégrant les maladies et facteurs de risque associés, permettrait de définir et de comparer des interventions visant à améliorer la santé et à réduire les inégalités liées à cette exposition.

6 Identification d'options d'action pour réduire l'imprégnation au cadmium

6.1 Cadre général et objectifs

La méthodologie de l'expertise (cf. chapitre 3) inclut une étape d'identification et d'analyse d'options d'action pour réduire l'imprégnation de la **population générale française** au cadmium à l'aide d'une approche socio-économique.

Pour réaliser ce travail, le GT a pris appui sur le référentiel méthodologique d'analyse socio-économique d'options d'action (ASEOA) à l'Anses⁴⁷. Celui-ci présente « l'action » comme une intervention, mesure, dispositif ou instrument, conçus et mis en place pour répondre à une situation considérée comme problématique. L'action peut être le fait des autorités publiques en interactions avec des acteurs privés – dans ce cas, on parle « d'action publique » (Halpern et al., 2014). Le référentiel ASEOA, dont l'utilisation demeure indicative et flexible en fonction des besoins de l'expertise collective, propose une démarche en quatre étapes, qui sont chacune abordées dans un ou plusieurs chapitres du présent rapport (cf. **Tableau 16**).

Tableau 16. Etapes du référentiel méthodologique d'analyse socio-économique d'options d'action (ASEOA) à l'Anses

Etapes du référentiel ASEOA	Chapitre(s) traitant de chaque étape
1. Comprendre la situation à risque	2, 4, 5
2. Identifier des options d'action	6
3. Analyser les différentes implications socio-économiques des options d'action	7
4. Mettre en perspective les options d'action analysées	9

La première étape de compréhension de la situation à risque a été essentiellement traitée dans les chapitres 2, 4 et 5 du présent rapport. Ces chapitres ont permis de mettre en lumière la toxicité du cadmium (2.1), la sur-imprégnation de la population française au cadmium (section 2.3), une partie des coûts associés au fardeau sanitaire du cadmium (section 2.4), la diversité des sources et voies d'exposition au cadmium pour la population générale (sections 2.2 et 4.1 à 4.7), ainsi que la contribution de différentes sources par différentes voies d'exposition à l'imprégnation de la population générale française au cadmium (chapitre 5). Ces différentes sources et voies d'exposition renvoient à des secteurs d'activité et acteurs potentiellement concernés par les diverses actions⁴⁸.

⁴⁷ Version endossée par le CES ASE le 30 Mai 2024 (phase test).

⁴⁸ Certaines mesures ont d'ailleurs déjà été évoquées dans les chapitres précédents, telles que des valeurs limites dans les engrais minéraux phosphatés et matières fertilisantes pour mieux protéger les consommateurs (section 2.2.2), les modalités de surveillance du cadmium dans la chaîne de production des denrées alimentaires actuellement en vigueur en France (section 2.5) ou encore les contraintes réglementaires fixées aux niveaux européen (lois cadre, règlement REACH) ou français (classification ICPE) (chapitre 4).

En s'appuyant sur ces différents éléments de compréhension des situations à risques, les objectifs du présent chapitre renvoient plus spécifiquement à la deuxième étape du référentiel ASEOA et notamment :

1. Identifier une pluralité de mesures⁴⁹ existantes ou discutées dans la littérature pour maîtriser les risques liés à l'exposition de la population générale au cadmium ;
2. Sélectionner des options d'action apparaissant au GT d'intérêt particulier dans le contexte de l'auto-saisine, en vue d'une analyse ultérieure de leurs implications.

Le travail d'identification des options d'action présenté dans ce chapitre vise donc à repérer, de façon large, l'ensemble des mesures existantes ou envisageables dans le périmètre de l'auto-saisine. Il constitue un préalable à une analyse des implications socio-économiques d'une sélection d'options d'action d'intérêt particulier qui sera présentée dans le chapitre 7, et dont les résultats seront mis en perspective dans le chapitre 9.

6.2 Méthodes

6.2.1 Identification des options d'action

Pour répondre à l'objectif d'identification d'une pluralité de mesures, le GT s'est appuyé sur une recherche bibliographique de type *scoping review*⁵⁰ conduite par l'équipe de coordination de l'Anses au démarrage de l'auto-saisine.

Cette recherche s'est appuyée sur la stratégie « Population-Intervention-Comparateur-Indicateur de santé-Temporalité » (*Population-Intervention-Comparison-Outcome-Timing*, PICOT) décrite dans le tableau ci-dessous :

<u>Population</u> (ou sujets étudiés)	Population humaine générale, exclusion des professionnels
<u>Intervention</u> ciblée	Mesures de maîtrise / atténuation de l'exposition au cadmium (toutes sources et voies <i>a priori</i>)
<u>Comparateur</u> : scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Pas de restriction <i>a priori</i>
<u>Outcome</u> : indicateur de santé	Exposition au cadmium, imprégnation et risque pour la santé humaine
<u>Temporalité</u> : périodes de recherche	10 dernières années (pour rendre compte de connaissances relativement actualisées), soit depuis 2013

⁴⁹ Les termes « mesure » et « option d'action » sont utilisés de façon interchangeable dans ce chapitre.

⁵⁰ Une *scoping review* a pour objectif de produire un panorama général et large des connaissances disponibles sur une question en s'appuyant sur une recension de la littérature scientifique. Ce travail permet d'identifier les thèmes sur lesquels des travaux ont été produits et les lacunes de connaissances (Peters et al., 2021).

La méthodologie de recherche bibliographique est détaillée en annexe 4. A partir du corpus documentaire constitué, un repérage macroscopique des mesures a été entrepris. Une première classification thématique des domaines d'action a été proposée à partir d'une analyse de la littérature, puis raffinée de façon itérative par le GT en fonction des sources et voies d'exposition et des pistes de prévention identifiées. Cette démarche a amené le GT à catégoriser les options selon cinq **domaines** d'action pour limiter le risque lié à l'exposition au cadmium de la population générale :

- les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine et les matériaux au contact des denrées alimentaires,
- les intrants et activités agricoles, activités aquacoles et la pêche,
- les activités industrielles, liées aux services, celles liées aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage,
- les produits du tabac,
- la prévention secondaire⁵¹ et la prise en charge des individus exposés⁵².

Les options d'action identifiées en lien avec chacun de ces domaines sont présentées dans la section 6.3. Ces options d'action peuvent viser la source initiale de cadmium, les transferts ou l'exposition des individus.

6.2.2 Sélection des options d'actions à étudier

Une fois les domaines et options d'action correspondantes identifiés, des informations générales relatives à chaque option ont été reportées dans les tableaux figurant dans la section 6.3. Ces informations sont issues des précédents chapitres ou de la recherche documentaire réalisée (littérature scientifique, littérature grise, réglementation en vigueur). Elles permettent de décrire de façon globale les acteurs ciblés ainsi que des éléments de contextes international et français en lien avec les options identifiées (existence de mesures déjà appliquées à l'international / en Europe / en France, existence de travaux sur le sujet, recommandations émises par des institutions scientifiques...).

Ceci a permis au GT de conclure sur la pertinence d'étudier plus précisément les implications de certaines options d'action compte-tenu du cadrage de l'auto-saisine, des compétences et méthodes requises, des données disponibles, du calendrier de l'auto-saisine ou encore des travaux déjà réalisés par d'autres organismes. La conclusion de chaque sous-section de la partie 6.3 synthétise l'appréciation du GT à cet égard.

Une analyse plus précise des implications d'une sélection d'options d'action est ensuite proposée dans le chapitre 7.

⁵¹ La prévention secondaire vise à détecter précocement les maladies existantes afin de stopper ou de retarder la progression de la maladie et ses effets, par exemple grâce au dépistage et à d'autres programmes de détection précoce tels que les bilans de santé de routine (traduit de OMS, 2021 : <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/96da8799-4938-4d66-b171-04770ed4b243/content>)

⁵² La prévention secondaire et la prise en charge des individus relevant d'une expertise biomédicale (hors champ de compétence du GT), ce domaine d'action n'a pas été approfondi dans le cadre de l'expertise.

6.3 Options d'action identifiées

L'objectif de cette partie est de dresser un panorama large des domaines et options d'action pour réduire l'exposition au cadmium de la population générale française. L'information présentée sur chaque option est d'ordre général, mais suffisante pour permettre au GT d'opérer une sélection raisonnée des options apparaissant les plus pertinentes dans le contexte de l'auto-saisine, en vue d'analyser ultérieurement leurs implications (chapitre 7).

6.3.1 Mesures concernant les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et les matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA)

D'après la modélisation de l'exposition agrégée et la prédiction de la cadmiurie présentée dans le chapitre 5, l'alimentation a été identifiée comme une source majeure à l'imprégnation humaine au cadmium dans la population française, toutes classes d'âge confondues. Pour la population générale non-fumeuse, l'ingestion d'aliments explique majoritairement jusqu'à 98% de l'imprégnation humaine au cadmium. Ce résultat confirme le fait que, hors tabagisme, l'alimentation est la principale voie d'exposition humaine au cadmium pour la population générale en accord avec les précédentes études (Efsa, 2009 ; Anses, 2011a,b et 2019 ; Oleko et al., 2021).

Pour rappel, les EAT conduites successivement par l'Anses, se focalisant sur l'exposition humaine au cadmium uniquement par l'alimentation, mettent en relief des dépassements de la valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion pour une proportion non négligeable de la population française.

Spécifiquement, les groupes de denrées alimentaires identifiés dans le chapitre 5 comme des contributeurs majeurs sont ceux aussi identifiés dans les EAT (EAT2, EAT3, EATi) : les pommes de terre, les produits céréaliers (céréales infantiles, pain et produits de panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que les légumes.

Ces résultats sont congruents avec ceux de l'étude Esteban (2014-2016) conduite par Santé publique France (Oleko et al., 2021), qui a permis de mesurer les niveaux d'imprégnation par le cadmium de la population française continentale⁵³ des adultes (18 à 74 ans) et des enfants (6 à 17 ans). Une augmentation des niveaux par rapport à la précédente étude d'imprégnation a été associée à la consommation de céréales au petit déjeuner pour les enfants et à la consommation de coquillages et de crustacés chez les adultes (cf section 2.3).

Par ailleurs, des travaux de modélisation spatiale des expositions environnementales aux substances chimiques indiquent que l'exposition alimentaire au cadmium est susceptible d'être plus élevée chez les individus consommant régulièrement des produits issus de sols présentant des teneurs particulièrement élevées en cadmium (ex. fruits et légumes) (Caudeville, 2011). La problématique peut par exemple se poser dans le cas de certains jardins potagers (Bidar et al., 2020, Douay et al., 2013, Durand et al., 2015).

Enfin, comme cela est développé dans le chapitre 4, les matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA) (métaux et alliages, matériaux inorganiques, notamment les céramiques

⁵³ Dans l'étude Esteban, la population générale continentale correspond à la « population métropolitaine hors Corse » (Balicco et al., 2017).

et objets émaillés) sont aussi une source potentielle de cadmium, ce dernier étant susceptible de migrer de la vaisselle vers l'aliment. Toutefois, en France, au regard des résultats des contrôles réalisés, la contribution seule des MCDA à l'exposition du consommateur apparaît comme faible.

Compte-tenu de ces possibilités d'exposition au cadmium par la voie de l'alimentation, cette section vise à identifier des actions déjà appliquées ou envisageables en lien avec les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) incluant les matériaux au contact de l'eau (MCDE), et les MCDA. Dans un premier temps sont présentées les réglementations et normes françaises et les principales réglementations européennes et internationales. Dans un second temps sont identifiées des pratiques et techniques, pour prévenir ou maîtriser la contamination et l'exposition. Enfin, le GT pointe des options d'action pour lesquelles il lui apparaît utile d'apporter un éclairage complémentaire dans le contexte français.

6.3.1.1 Réglementation et normes

Quelques options relèvent de réglementations et de normes visant les denrées alimentaires, les EDCH et MCDE, et les MCDA (cf. **Tableau 17**).

- *Denrées alimentaires*

A l'échelle européenne, le règlement européen 2023/915 (abrogeant le règlement (CE) n°1881/2006) inclut des **teneurs maximales (TM) réglementaires en cadmium** dans une diversité de denrées alimentaires destinées à la consommation humaine⁵⁴. Ces TM vont de 0,005 mg kg⁻¹ dans le cas de certaines préparations pour nourrissons à 3 mg kg⁻¹ dans le cas de certains compléments alimentaires à base d'algues ou de mollusques bivalves séchés. D'après le règlement européen 2023/915, dans le cas d'un risque pour la santé associé aux contaminants dans les denrées alimentaires, il convient de fixer des TM à un niveau « aussi bas que raisonnablement possible » (ALARA), de façon à garantir l'application par les exploitants du secteur alimentaire de mesures qui préviennent ou réduisent autant que possible la contamination en vue de protéger la santé publique. A l'échelle internationale, d'autres pays disposent de valeurs réglementaires sur certaines denrées (cf. **Tableau 17**). Des teneurs maximales indicatives ont également été établies par le *Codex Alimentarius* (2023). Certains pays, comme le Canada ou les Etats-Unis, n'appliquent pas de TM réglementaires en cadmium dans les aliments (FDA, 2024 ; Health Canada, 2025). Les TM européennes sont généralement reconnues comme exigeantes, et ont pu être perçues par des pays tiers comme une barrière à l'exportation vers l'Union européenne de certaines de leurs productions (Figueroa, 2008 ; Gray et Cavanagh, 2022).

Néanmoins, en France, de précédents avis de l'Afssa (2007) et de l'Anses (2011, 2020a, 2020b) ont souligné l'**absence de teneurs maximales réglementaires pour certains**

⁵⁴ Les fruits et fruits à coque (3.2.1), les légumes-racines et les légumes-tubercules (3.2.2), les légumes-bulbes (3.2.3), les légumes-fruits (3.2.4), les légumes du genre Brassica (3.2.5), les légumes-feuilles et fines herbes (3.2.6), les légumineuses potagères (3.2.7), les légumes-tiges (3.2.8), les champignons (3.2.9), les légumineuses séchées (3.2.10), les graines oléagineuses (3.2.11), les céréales (3.2.12), les produits d'origine animale (3.2.13), les produits de la pêche (3.2.14), les produits à base de cacao et de chocolat (3.2.15), le sel (3.2.16), les préparations pour nourrissons et denrées alimentaires pour les nourrissons et les préparations pour enfants en bas âge (3.2.17 à 20), et certains compléments alimentaires composés à au moins 80 % d'algues marines séchées, de produits dérivés d'algues marines ou de mollusques bivalves séchés (3.2.21).

produits de la mer susceptibles d'être particulièrement contaminés en cadmium tels que les bulots et les algues. En effet, la réglementation européenne inclut des teneurs maximales en cadmium pour les poissons, les crustacés, les mollusques bivalves ou les céphalopodes, mais ce n'est pas le cas pour les gastéropodes (bulots, bigorneaux) ou les algues alimentaires.

En conclusion d'une précédente expertise, l'Anses concluait (2020b, p.36) « tous contaminants confondus, qu'il appart[enait] à l'autorité compétente - en situation où des dépassements de valeurs sanitaires de référence sont observés pour une fraction de la population - d'identifier et de définir les leviers de gestion appropriés, pour les aliments qui constituent des nouveaux entrants par rapport à l'existant : mise en œuvre de teneurs maximales basées sur la statistique des contrôles dans une démarche ALARA (par exemple en fixant une valeur de type p95), utilisation de teneurs limites existantes dans d'autres catégories alimentaires (par ex. les légumes) ou dispositions spécifiques à différentes catégories plus fortement contributrices (recommandations ou teneurs maximales spécifiques) ».

Outre les TM en cadmium, d'autres actions réglementaires ont été identifiées par le GT, telles que des **restrictions sur la valorisation de denrées issues de sols ou zones contaminées** (cf. également annexe 6). En France, des restrictions appliquées à certaines denrées agricoles, aquacoles ou issues de la pêche ont ainsi été repérées. Le GT attire l'attention sur l'abrogation en 2022 de l'interdiction de la pêche des bulots de taille supérieure à 70 mm dans certaines zones connues pour leur contamination en cadmium. Dans une précédente analyse de données, l'Anses (2020a) avait conclu que la chair des bulots est significativement moins contaminée en cadmium que le tortillon, et que la taille (coquille > 70 mm) et la cuisson des bulots sont associées à un accroissement de la contamination mesurée dans la chair. L'analyse concluait également que le niveau de contamination varie selon la zone de pêche. Au vu de ces résultats et afin de limiter l'exposition alimentaire des consommateurs de bulots, l'Anses recommandait de ne pas consommer le tortillon. Cette recommandation a également été formulée dans le "Petit guide de l'auto-consommation en toute sécurité" publié sur le site du Ministère de la Santé (Ministère de la Santé et de la Prévention, 2023).

L'identification par le GT des options d'action visant les denrées alimentaires a par ailleurs permis de repérer des dispositifs réglementaires permettant d'assurer le **contrôle et la surveillance de la teneur en cadmium dans les denrées alimentaires** à l'échelle européenne et française. En France, ces actions reposent sur différents leviers mis en place par les pouvoirs publics tels que les plans de surveillance de l'exposition du consommateur et les plans de contrôle des denrées présentant un risque accru de contamination. Ces actions reposent aussi sur les autocontrôles et le signalement des non-conformités par les acteurs privés. Plus spécifiquement, dans l'expertise susmentionnée de l'Anses sur les bulots, l'Agence avait « attir[é] l'attention de la DGA sur l'importance de conduire dans leur ensemble les plans d'échantillonnage programmés afin de disposer de données suffisantes pour réaliser les expertises demandées ».

- *Eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et matériaux au contact de l'eau (MCDE)*

Concernant les EDCH, la réglementation prévoit des **valeurs limites en cadmium dans l'eau de consommation**, à l'échelle européenne et française. En France, une limite de qualité de 5,0 µg L⁻¹ a été fixée dans les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine et les eaux destinées à la consommation humaine (Arrêté modifié du

11/01/2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine). Par ailleurs, une limite de qualité de $3,0 \mu\text{g L}^{-1}$ a été fixée pour l'eau minérale naturelle, et une valeur limite de $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ s'applique pour l'eau de source et l'eau rendue potable par traitement et conditionnées (Arrêté du 14 mars 2007 modifié relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de source conditionnées). D'après l'EAT2, les résultats d'analyses réalisées en 2007-2008 indiquaient des valeurs en cadmium non-déTECTABLES ou non-quantifiables⁵⁵ pour la plupart des échantillons d'eau du robinet (15/16), d'eau de source (16/16) ou d'eau minérale (11/14). Les quatre valeurs quantifiées se situaient en-dessous de $3 \mu\text{g L}^{-1}$ ⁵⁶. A titre comparatif les résultats de l'EAT3 indiquent que le cadmium est détecté dans 60% des échantillons et quantifié dans 10% des échantillons d'eaux embouteillées. La concentration maximale en cadmium quantifiée dans les eaux embouteillées est de $0,03 \mu\text{g L}^{-1}$.

Des valeurs limites réglementaires en cadmium dans l'eau de consommation existent dans d'autres pays (p.ex. entre 3 et $7 \mu\text{g L}^{-1}$ aux Etats-Unis, au Canada, en Chine ou en Inde). Par ailleurs, la norme générale du *Codex Alimentarius* (2023) inclut une valeur limite en Cd dans les eaux minérales naturelles de $3 \mu\text{g Cd L}^{-1}$. Les directives sur la qualité de l'eau de boisson de l'OMS (2017a) incluent le cadmium parmi les valeurs guides affectées à des « produits chimiques dont la présence dans l'eau de boisson est importante sur le plan sanitaire », à hauteur de $3 \mu\text{g Cd L}^{-1}$. Il y est précisé que les niveaux de cadmium dans l'eau de boisson sont habituellement inférieurs à $1 \mu\text{g L}^{-1}$.

Concernant les MCDE, des concentrations maximales tolérables au robinet du consommateur (MTC_{tap}) figurent dans la décision d'exécution (UE) 2024/367⁵⁷ pour les MCDE métalliques ($\text{MTC}_{\text{tap, métallique}} : 2,5 \mu\text{g L}^{-1}$), cimentaires ($\text{MTC}_{\text{tap, cimentitieux}} : 0,5 \mu\text{g L}^{-1}$), émaux, céramiques et autres matériaux inorganiques ($\text{MTC}_{\text{tap, inorganique}} : 0,25 \mu\text{g L}^{-1}$).

- Matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA)

Concernant les MCDA, les exigences générales sont régies par un règlement cadre ((CE) n°1935/2004) applicable à 17 catégories de matériaux et objets destinés à entrer en contact avec les aliments, devant satisfaire au principe d'inertie et d'innocuité. Des mesures spécifiques sont déclinées ensuite par type de matériau dans différents règlements ou textes / décrets spécifiques, au niveau européen ou au niveau national en l'absence de réglementation européenne. Ces mesures spécifiques peuvent comporter des critères de pureté applicables à certaines substances au stade du matériau ou de l'objet fini, telles que des **restrictions relatives à la composition du matériau ou des limites de migration spécifiques**. En France, en l'absence de réglementation européenne sur certains matériaux, la DGCCRF établit des critères et des modalités de vérification des MCDA précisées dans des fiches publiées sur son site Internet (DGCCRF, 2025b) (cf. **section 4.5** et **Tableau 1**).

⁵⁵ Limites analytiques de détection de $0,0005 \text{ mg Cd /kg}$ et de quantification à $0,001 \text{ mg Cd kg}^{-1}$.

⁵⁶ $0,00174 \mu\text{g g}^{-1}$ pour un échantillon d'eau du robinet ; $0,00098 \mu\text{g g}^{-1}$, $0,00138 \mu\text{g g}^{-1}$, $0,001 \mu\text{g g}^{-1}$ pour trois échantillons d'eau minérale.

⁵⁷ Décision d'exécution (UE) 2024/367 de la Commission du 23 janvier 2024 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil en établissant les listes positives européennes des substances de départ, des compositions et des constituants dont l'utilisation est autorisée pour la fabrication de matériaux ou de produits entrant en contact avec l'eau destinée à la consommation humaine.

Pour pallier le manque d'harmonisation de la réglementation concernant certains MCDA au niveau européen, le Conseil de l'Europe (2020) a adopté une résolution sur l'innocuité et la qualité des matériaux et objets en contact alimentaire (CM/Res(2020)9). Bien qu'elle ne soit pas contraignante, cette résolution recommande aux États membres de prendre des dispositions nationales en complément de la réglementation européenne en vigueur. Ainsi, en ce qui concerne le cadmium, la dernière version du Guide technique sur les métaux et alliages constitutifs des matériaux et objets pour contact alimentaire établit une limite de libération spécifique (LLS) de 0,005 mg Cd kg⁻¹ de denrées alimentaires. Le Guide précise que sont prises en compte dans l'établissement des LSS les informations toxicologiques, le principe ALARA, le cas échéant, et la législation pertinente (EDQM-Conseil de l'Europe, 2024)⁵⁸.

En pratique, les limites de migration autorisées par la législation européenne sont rarement dépassées et, lorsqu'elles le sont, elles concernent principalement des articles importés depuis l'extérieur de l'Union européenne. En France, seules des données relatives aux plans annuels de contrôle des MCDA par la DGCCRF ont pu être recueillies. Sur la période 2018-2022, peu de dépassements des critères réglementaires ont été identifiés concernant le cadmium (2 à 3,4 %) sur les matériaux inorganiques incluant les céramiques et émaux (sur 28 à 50 prélèvements/an réalisés) (cf. section 4.5).

⁵⁸ Pour la LLS appliquée au cadmium, les calculs ont été établis sur la base d'un coefficient de répartition égal à 10% de la VTR de l'EFSA pour le cadmium (2009), en supposant une consommation quotidienne d'1 kg d'aliments emballés et/ou préparés à l'aide de matériaux en métaux et alliages pour contact alimentaire, pour une personne de 60 kg. Il est précisé que la limite calculée serait alors de 0,002 mg Cd kg⁻¹, mais qu'il a été décidé de la porter à 0,005 mg Cd kg⁻¹, compte-tenu de la teneur maximale en cadmium de l'eau de boisson établie à 0,005 mg L⁻¹ dans l'UE (Directive (UE) 2020/2184).

Tableau 17. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec les denrées alimentaires, EDCH et MCDA

REGLEMENTATION OU NORMES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Denrées alimentaires			
Teneurs maximales (TM) en cadmium dans les denrées alimentaires	Producteurs, transformateurs, distributeurs de denrées alimentaires	Réglementation européenne (Règlement UE 2023/915) incluant des TM en Cd dans certaines denrées alimentaires destinées à la consommation humaine selon le principe ALARA incluant les fruits et fruits à coque, légumes, champignons, graines, céréales, viandes, produits de la pêche et mollusques bivalves, produits à base de cacao et de chocolat, sel, produits destinés aux nourrissons, compléments alimentaires (0,005–3 mg Cd kg⁻¹). Norme générale du Codex Alimentarius (CXS 193-1995, MAJ 2023) pour les contaminants et les toxines présents dans les produits de consommation humaine et animale incluant des valeurs limites en Cd dans certains aliments (0,05–2 mg Cd kg⁻¹). TM réglementaires dans d'autres pays, p.ex. : Australie et Nouvelle-Zélande (FSANZ) : TM en Cd dans certaines denrées selon le principe ALARA (légumes verts, légumes racines et tubercules, blé, cacahuètes, riz, viande, foie et reins de bovins / ovins / porcins, chocolat et produits à base de cacao, mollusques, sel) (0,05–2,5 mg kg⁻¹) (Australian Department of Health and Aged Care, 2024). Chine : TM en Cd dans certaines denrées (céréales, légumes, fruits, champignons, haricots, noix, viandes, abats, produits de la mer, œufs, condiments, compléments alimentaires pour enfants) (0,05-3 mg kg⁻¹) (USDA, 2023)⁵⁹. Inde : TM en Cd dans certaines denrées (céréales, fruits, légumes, légumineuses, pommes de terre, mollusques, céphalopodes, crustacés, poissons, condiments, préparations pour bébés) (0,05-2 mg kg⁻¹) (FSSAI, 2020).	Application de la réglementation européenne (Règlement UE 2023/915 entré en vigueur le 25 mai 2023).

⁵⁹ Les valeurs maximales réglementaires de contaminants dans les aliments en Chine n'ayant pu être identifiées en anglais sur le site internet de l'autorité compétente (english.samr.gov.cn, consulté le 20 octobre 2025), un document de l'*US Department of Agriculture* traduisant cette réglementation a été consulté (section 4.2 sur le cadmium).

Restrictions sur la valorisation de denrées issues de sols ou zones contaminées	Producteurs, transformateurs, distributeurs de denrées, consommateurs (auto-production)	<i>Option d'action n'ayant pas fait l'objet d'une recherche documentaire à l'échelle internationale / européenne.</i>	Retrait systématique des foies et reins d'équidés à l'abattoir (du fait du nombre important de non-conformités) : arrêté du 28 juin 2019, modifiant l'arrêté du 18 décembre 2009 relatif aux règles sanitaires applicables aux produits d'origine animale et aux denrées alimentaires en contenant. Seuil d'alerte national pour les gibiers en l'absence de Teneur maximale réglementaire (Instructions techniques DGAI). Restrictions visant la valorisation des denrées produites sur des sols pollués (p.ex. pollutions associées à d'anciens sites industriel en zone agricole dans les Hauts-de-France, en zone aquacole dans l'estuaire de la Gironde, cf. annexe 6). Arrêté inter-préfectoral d'avril 2008 relatif au classement de salubrité et à la surveillance des zones de production situées en Manche Est au large des départements de la Seine-Maritime, du Calvados et de la Manche, établissant le classement des zones de coquillages du groupe 1 (gastéropodes, échinodermes et tuniciers) en « D » pour les bulots de taille supérieure à 70 mm, soit une interdiction de pêche ; « A provisoire » pour les bulots de taille inférieure à 70 mm et pour ceux de taille supérieure à 70 mm mais subissant un décorticage en établissements agréés. <u>Mesure abrogée</u> par arrêté inter-préfectoral en 2022 (Arrêté portant abrogation de l'arrêté inter-préfectoral du 28 avril 2008 relatif au classement de salubrité et à la surveillance des zones de production de bulots (<i>buccinum undatum</i>) situés en Manche Est au large des départements de la Seine-Maritime, du Calvados et de la Manche).
Contrôle et surveillance de la teneur en cadmium dans les denrées alimentaires	Producteurs, transformateurs, distributeurs de denrées alimentaires, pouvoirs publics	Réglementation européenne fixant les exigences en matière de contrôle des contaminants chimiques et des additifs à risque dans les denrées alimentaires : règlements d'exécution (UE) n° 2022/932 et règlement délégué (UE) n° 2022/931. Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) basé sur le règlement (CE) n°178/2002 (<i>General Food Law</i>) visant la transmission rapide d'information entre États membres en cas de	Système national de contrôle pour la sécurisation sanitaire de la chaîne alimentaire (PNCOPA) : plans de surveillance de l'exposition du consommateur et plans de contrôle visant des denrées présentant un risque accru de contamination, y compris en ce qui concerne le cadmium (Ministère de l'Agriculture, 2024). Autocontrôles par les opérateurs privés et signalement des non-conformités, notamment selon article L. 423-3 du code de

		risques pour la santé publique relatifs à la sécurité sanitaire des aliments et la mise en place d'actions par les autorités sanitaires. Recommandation (UE) 2018/464 que les États membres, en coopération avec les exploitants du secteur alimentaire et du secteur de l'alimentation animale, surveillent, au cours des années 2018, 2019 et 2020, la présence d'arsenic, de cadmium, d'iode, de plomb et de mercure dans les algues marines, les halophytes et les produits à base d'algues marines.	la consommation imposant aux opérateurs professionnels (fabricants, importateurs, distributeurs...), dès qu'ils en ont connaissance, d'informer les autorités compétentes des risques présentés par les produits destinés au consommateur qu'ils ont mis sur le marché et des mesures qu'ils ont prises pour écarter ces risques.
Eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et matériaux au contact de l'eau (MCDE)			
Valeurs limites en cadmium dans l'eau destinée à la consommation	Personnes responsables de la production et distribution de l'eau (PRPDE)	Directive (UE) 2020/2184 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine incluant une exigence minimale relative à la valeur paramétrique pour le cadmium de 5 µg L⁻¹. - Limite de qualité pour le cadmium dans l'EDCH étant valeur de référence pour des concentrations maximales tolérables au robinet du consommateur (MTC_{tap}) dans la décision d'exécution (UE) 2024/367 pour les MCDE métalliques (MTC_{tap, metallic} : 2,5 µg L⁻¹), cimentaires (MTC_{tap, cementitious} : 0,5 µg L⁻¹), émaux, céramiques et autres matériaux inorganiques (MTC_{tap, inorganic} : 0,25 µg L⁻¹) (Décision d'exécution (UE) 2024/367 portant modalités d'application de la directive (UE) 2020/2184 en établissant les listes positives européennes des substances de départ, des compositions et des constituants dont l'utilisation est autorisée pour la fabrication de matériaux ou de produits entrant en contact avec l'EDCH). Directive 2006/118/CE du parlement Européen et du Conseil sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration, dans les masses d'eau utilisées pour le captage d'eau potable ou destinée à un tel usage à l'avenir ; il s'agit notamment de réduire le degré de traitement de purification nécessaire à la production d'eau potable, en invitant les Etats Membres à établir des valeurs seuils pour une liste minimale de polluants d'origine naturelle ou anthropique, dont le cadmium.	Arrêté modifié du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique, fixant une limite de qualité de 5,0 µg Cd L⁻¹. Arrêté du 14 mars 2007 modifié relatif aux critères de qualité des eaux conditionnées, aux traitements et mentions d'étiquetage particuliers des eaux minérales naturelles et de sources conditionnées : limite de qualité de 3 µg Cd L⁻¹ pour l'eau minérale naturelle et l'eau de source conditionnée, et de 5 µg Cd L⁻¹ pour l'eau de source et l'eau rendue potable par traitement conditionnées.

		Norme générale du Codex Alimentarius (CXS 193-1995, MAJ 2023) incluant des valeurs limites en Cd dans les eaux minérales naturelles de 3 µg Cd L⁻¹. Directives de qualité pour l'eau de boisson de l'OMS (2017a) : valeurs guides affectées à des produits chimiques issus de sources industrielles et de zones d'habitation humaine dont la présence dans l'eau de boisson est importante sur le plan sanitaire, incluant le cadmium : 3 µg Cd L⁻¹ (basé sur le document de référence pour l'élaboration des lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'eau de boisson, 2004). Valeurs limites repérées dans d'autres pays, p.ex. : États-Unis : 5 ppm dans l'eau en bouteille (FDA, 2024). Chine : 5 µg Cd L⁻¹ dans l'eau potable conditionnée (à l'exclusion de l'eau minérale potable); 3 µg Cd L⁻¹ dans l'eau minérale (USDA, 2023). Inde : eau minérale naturelle, eau potable conditionnée : 3 µg Cd L⁻¹ (FSSAI, 2020). Canada : recommandations pour la qualité de l'eau potable incluant une concentration maximale acceptable (CMA) de 7 µg L⁻¹ pour le cadmium, sur la base d'un échantillon d'eau prélevé au robinet (Santé Canada, 2020).	
Matériaux en contact avec les denrées alimentaires (MCDA)			
Teneurs maximales (TM) en cadmium dans les MCDA ou limites de migration dans les aliments	Producteurs et distributeurs de MCDA	Réglementation européenne (CE) n°1935/2004 définissant des exigences générales qui s'appliquent aux matériaux et objets (17 catégories) destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les denrées, produits et boissons alimentaires mis sur le marché communautaire, incluant les métaux parmi les groupes susceptibles d'être soumis à des mesures spécifiques. Réglementation européenne (Directive 84/500/CE du 15 octobre 1984, modifiée par la Directive 2005/31/CE) relative au rapprochement des législations des États membres en ce qui concerne les objets céramiques destinés à entrer en contact	En l'absence de réglementation européenne, restrictions établies par la DGCCRF (critères, modalités de vérification figurant dans des fiches dédiées) relatives à la composition du matériau ou des limites de migration spécifiques pour le cadmium (p.ex. métaux et alliages, matériaux inorganiques (verre, cristal céramique, vitrocéramique et objets émaillés) matériaux plastiques) (DGCCRF, 2025b). Restrictions prenant appui le cas échéant sur des textes de loi et normes, p.ex. : Arrêté du 23 mai 2006 modifiant l'arrêté du 7 novembre 1985 relatif à la limitation des quantités de plomb et de

		avec les denrées alimentaires, fixant des limites de « quantités de Cd cédées par les objets céramiques » : - Catégorie 1 - Objets non remplissables et objets remplissables dont la profondeur interne mesurée entre le point le plus bas et le plan horizontal passant par le bord supérieur est inférieure ou égale à 25 mm : 0,07 mg dm² - Catégorie 2 - Tous autres objets remplissables : 0,3 mg L⁻¹ ; - Catégorie 3 - Ustensiles de cuisson : emballages et récipients de stockage ayant une capacité supérieure à trois litres : 0,1 mg L⁻¹. Règlement (UE) n° 10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires, listant le Cd comme une substance qui ne peut être libéré à un niveau détectable (limite de détection à 0,002 mg kg⁻¹ de denrée alimentaire). Annexe XVII du Règlement Européen REACH listant des substances, dont le Cd, faisant l'objet de restrictions dans le cas des MCDA en bois. Directive 94/62/CE du 20 décembre 1994 relatif aux emballages et aux déchets d'emballage, fixant des niveaux de concentration de métaux lourds présents dans les emballages ou ses éléments (somme pour le plomb, cadmium, mercure et chrome hexavalent) ne dépassant pas 100 ppm.	cadmium extractibles des objets en céramique mis ou destinés à être mis au contact des denrées, produits et boissons alimentaires, reprenant la typologie de produits et les limites figurant dans la Directive 84/500/CE. Arrêté du 25 novembre 1992 relatif aux matériaux et objets en élastomères de silicone mis ou destinés à être mis au contact des denrées, produits et boissons alimentaires, incluant des teneurs maximales en cadmium. Arrêté du 5 août 2020 relatif aux matériaux et objets en caoutchouc destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et aux sucettes pour nourrissons et enfants en bas-âge, incluant des teneurs maximales en cadmium.
Prévention, contrôle et surveillance de la contamination en cadmium des MCDA	Producteurs et distributeurs de MCDA	Réglementation européenne (CE) n°1935/2004 définissant des exigences générales qui s'appliquent aux matériaux destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires, en matière de déclaration de conformité, de traçabilité, d'inspection et de contrôle par les Etats Membres. Réglementation européenne (CE) n° 2023/2006 modifié par le règlement (CE) n° 282/2008 établissant des règles relatives aux bonnes pratiques de fabrication (BPF) des MCDA.	Autocontrôles par les opérateurs privés et signalement des non-conformités, notamment selon article L. 423-3 du code de la consommation (voir ci-dessus), qui s'applique également aux MCDA. Enquêtes nationales sur l'aptitude au contact alimentaire des objets, menées par la DGCCRF auprès des importateurs, fabricants, transformateurs et distributeurs, incluant les limites de migration pour le cadmium dans les objets en céramique.

6.3.1.2 Pratiques et techniques

Outre les réglementations et les normes, des pratiques et techniques ont été identifiées par le GT pour agir sur l'exposition de la population au cadmium dans les denrées alimentaires, les EDCH et les MCDA (**Tableau 19**).

- *Denrées alimentaires*

Cela inclut des **recommandations ou actions de sensibilisation à l'intention du grand public** afin de réduire son exposition alimentaire au cadmium. Ainsi, aux États-Unis, en complément de la démarche « Closer to Zero » visant une amélioration des pratiques de production et de transformation pour réduire les niveaux de contaminants dans les denrées (dont le cadmium), il est recommandé d'apporter aux jeunes enfants (6-12 mois) des aliments variés adaptés à leur âge, et d'inclure des aliments riches en fer et en zinc pour prévenir les effets néfastes de certains contaminants dont le cadmium. Une alimentation variée contribue à l'apport de nutriments essentiels à leur développement tout en réduisant l'exposition répétée au même contaminant issu d'une même denrée (Food and Drug Administration, 2023). Des recommandations similaires sont formulées à l'attention des consommateurs (Schaefer et al., 2020).

A l'échelle de l'ensemble de la population française, le GT recommande également de promouvoir une alimentation diversifiée, en variant les sources d'approvisionnement, afin de couvrir les besoins nutritionnels, et pour éviter l'éventuelle exposition répétée au cadmium en raison de la consommation régulière d'une denrée provenant d'une source d'approvisionnement unique. Le GT conclut par ailleurs que les principaux contributeurs à l'exposition alimentaire au cadmium (p.ex. pommes de terre, céréales, légumes) sont à la fois très consommés et constituent pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base. De fait, le GT considère que les leviers d'action majeurs sur la problématique du cadmium se situent en amont de la contamination des denrées alimentaires pour agir sur leur qualité, et non sur les comportements alimentaires. Ainsi, il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés, qui seraient spécifiques au cadmium. Néanmoins, en Europe et en France, des recommandations très ciblées du fait de la contamination en cadmium de certaines parties d'aliments ont été repérées, par exemple la recommandation de ne pas consommer la chair brune du crabe ou le tortillon des bulots (European Commission, 2011, Ministère de la santé et de la prévention, 2023). Le GT n'a pas identifié d'informations relatives à la connaissance de ces recommandations par les consommateurs ou à leur transfert dans la pratique.

Sans qu'il n'en soit ici fait un recensement exhaustif, le GT a également identifié des **approches ou dispositifs de sensibilisation des acteurs concernés par des sites pollués au cadmium**, ou **d'appui à la mise en œuvre de restrictions** en ce qui concerne la consommation de denrées alimentaires produites sur ces sites ou de l'eau du robinet. En France, ces mesures sont notamment évoquées dans le rapport du Haut Conseil de la Santé Publique (2022) abordant les « mesures de gestion du risque en cas de dépassement des valeurs repères » pour le cadmium dans les sols pollués, en ce qui concerne la mise sur le marché des produits et les jardins potagers privés. Ce rapport renvoie vers les autorités publiques territoriales (ARS, DREAL) qui sont notamment en charge d'élaborer des recommandations destinées aux riverains de sites et sols pollués en fonction de la situation sanitaire et du contexte (ex. limitations d'usage des sols en matière de jardins collectifs ou de

zones de cueillette, recommandations en matière de consommation de productions animales ou végétales issus du site). Il renvoie également vers le guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués (DGPR, 2011).

De façon plus spécifique, quelques publications de synthèse évoquent l'existence de travaux sur des **techniques et technologies d'élimination du cadmium dans certains aliments** (riz, cacao). Ils soulignent par exemple l'intérêt de bonnes pratiques de préparation du riz (ex. méthodes de lavage, trempage, rinçage), relativement simples à mettre en œuvre mais à l'efficacité limitée. Des technologies plus sophistiquées et efficaces existent (ex. retrait du cadmium par des méthodes chimiques ou de fermentation microbienne) : elles sont diversifiées et continuent d'évoluer, mais leurs effets sur l'aliment et leur application dans le cadre de la production alimentaire à grande échelle nécessitent davantage de recherches (Genchi et al., 2020 ; Wang et al., 2023).

Des **initiatives volontaires d'amélioration des dispositifs de surveillance et de contrôles de la teneur en cadmium dans les denrées alimentaires** ont également été identifiées. En France, différents travaux menés sous l'égide de l'Anses ont, depuis plusieurs années, permis d'identifier les denrées les plus contributrices à l'exposition alimentaire au cadmium. C'est le cas des études de l'Alimentation Totale (EAT2 et EATi notamment), des saisines ayant mobilisé l'Agence suite aux travaux du Comité interministériel pour la modernisation de l'action publique (CIMAP) en matière de sécurité sanitaire des aliments (Anses, 2019a, 2019b, 2019c), ou de saisines spécifiques à certaines denrées (ex. risque sanitaire lié à la consommation de gibier, Anses, 2018a). Plus récemment, le rapport du groupe de travail sur le cadmium de la plateforme multipartenariale de la surveillance de la chaîne alimentaire (Plateforme SCA, 2023), identifie des produits dans lesquels la teneur moyenne en cadmium est généralement plus élevée (p.ex. abats, mollusques bivalves, graines de tournesol, cacao en poudre). Ce constat corrobore les conclusions de précédents travaux de l'Anses ayant identifié ces produits comme les aliments les plus contaminés au cadmium. Le rapport de la Plateforme SCA a aussi permis d'identifier des denrées pour lesquelles les concentrations brutes avoisinent (abats d'équins, poissons, mollusques notamment les huîtres) voire dépassent (fines herbes) le plus fréquemment les teneurs maximales réglementaires. Sur la période étudiée (2010-2019), les teneurs en cadmium sont décrites comme stables pour l'ensemble des matrices évaluées (sauf une baisse significative des concentrations en cadmium dans le blé dur) (voir aussi section 2.2.5). Le rapport inclut 18 recommandations (**Tableau 18**) sur l'amélioration de la surveillance du cadmium relatives aux méthodes d'échantillonnage, aux méthodes analytiques, à la qualité des données et aux collaborations à développer (Plateforme SCA, 2023).

Tableau 18. Recommandations d'amélioration de la surveillance du cadmium réparties en 4 domaines, selon le groupe de travail sur le cadmium de la plateforme de la surveillance de la chaîne alimentaire (Plateforme SCA, 2023)

Echantillonnage	
A1	Harmoniser les pratiques d'échantillonnage au niveau des filières à partir d'un socle de bonnes pratiques basées sur la réglementation, les normes françaises, CEN ou ISO existantes et les recommandations émises par les interprofessions ;
A2	Encourager les opérateurs à la définition de procédures internes déclinées à partir du socle réglementaire, normatif et professionnel ;
A3	Mieux suivre le déploiement et l'application des procédures internes par les responsables des plans d'échantillonnage à travers la traçabilité et l'enregistrement des opérations
Analyse	
B1	Encourager les laboratoires à respecter les exigences du Règlement CE n°333/2007, lesquelles étaient initialement formulées pour la surveillance officielle mais ont été étendues à l'ensemble de la surveillance en 2016 ;
B2	Inciter les professionnels de la chaîne alimentaire à vérifier l'adéquation des méthodes et leurs performances (méthodes validées) et inciter au report systématique de celles-ci (a minima les LD, LQ et incertitude) ;
B3	Proposer des formations courtes sur les exigences en termes de méthodes analytiques pour les personnes en charge de dispositifs de surveillance, afin qu'elles disposent des éléments nécessaires à l'analyse critique des résultats rendus, et ce quelle que soit l'échelle du dispositif ;
Exploitation des données	
C1	Bien cibler les informations indispensables et utiles à collecter, notamment les informations relatives aux méthodes, à leur performance analytique et à l'incertitude associée aux résultats ;
C2	Harmoniser les formats d'écritures des modalités afin de permettre une extraction plus facile des noms de matrices et de pays notamment ;
C3	Mettre en place des tests afin de repérer la saisie de valeurs numériques aberrantes ;
C4	Renseigner a minima le résultat de conformité de l'analyse, dans l'idéal renseigner l'ensemble des informations pertinentes pour leur interprétation (incertitude de mesure, facteur de conversion, taux d'humidité etc.) ;
C5	Envisager de collecter l'information relative à l'origine géographique des matières premières pour lesquelles ce facteur impacte fortement les concentrations en cadmium et notamment les produits suivants : - Les fèves de cacao et dérivés du cacao, afin de pouvoir distinguer les cacaos d'Amérique et ceux d'Afrique ; - Les aliments minéraux pour animaux, et notamment le phosphate calcique.
C6	Envisager de renseigner de façon plus détaillée la composition de certains produits transformés réglementés et notamment : - Les aliments complets pour animaux ; - Les préparations de suite et laits en poudre destinés à l'alimentation infantile
C7	Pour l'alimentation animale, flécher de manière claire les aliments complémentaires d'origine minérale afin de les distinguer de ceux d'origine non minérale, et indiquer le pourcentage de phosphore.
C8	Par ailleurs, ces travaux ont été limités par le faible nombre d'échantillons disponibles dans les jeux de données transmis pour certaines catégories de produits. Ainsi pour approfondir il serait nécessaire d'exploiter/acquérir davantage de données pour certaines matrices et notamment : - Les légumes ; - Les herbes fraîches ; - Les champignons ; - Les algues ; - Les produits issus de la panification ; - Les biscuits ; - Les céréales pour petit-déjeuner.
Collaborations	
D1	Inciter les professionnels à se rassembler par filière pour mieux surveiller les tendances ;

D2	Promouvoir des restitutions renforcées entre filières, en particulier les filières proches, et idéalement vers les autorités compétentes, en y associant la Plateforme SCA ;
D3	Organiser des Journées de la Plateforme SCA intégrant un bilan annuel sur le cadmium (puis éventuellement sur d'autres dangers traités préalablement par la Plateforme en GT) ;
D4	Constituer un groupe de travail chargé d'émettre des recommandations sur la collecte des données, pour élaborer un référentiel commun afin de s'assurer de l'homogénéité des résultats remontés.

- *Eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) et matériaux au contact de l'eau (MCDE)*

Des techniques de traitement visant à éliminer le cadmium peuvent être mises en œuvre dans les **filières de potabilisation**, au vu de la concentration maximale tolérable au robinet du consommateur (MTC_{tap}) pour le cadmium, qui doit être respectée pour les matériaux entrant en contact avec l'eau (métalliques, émaux, céramiques et cimentaires) utilisés dans les systèmes de distribution d'eaux (cf. 6.3.1.1).

Il existe par ailleurs des techniques de prévention de la corrosion en ajustant la qualité de l'eau potable, ainsi que des techniques d'élimination du cadmium dans l'eau à domicile.

Notons également le repérage, à l'échelle internationale, de deux documents mettant en évidence les bénéfices et limites de différentes **techniques de traitement du cadmium dans les EDCH**, visant les canalisations et le traitement de l'eau à domicile (OMS, 2017 ; Santé Canada, 2020).

- *Matériaux en contact avec les denrées alimentaires (MCDA)*

Enfin, ponctuellement, des **bonnes pratiques** sont évoquées dans la littérature afin d'éviter le transfert du cadmium dans les aliments au cours de leur transformation ou leur stockage (p.ex. qualité des ustensiles et des plastiques utilisés) (Schaefer et al., 2020). Sans qu'elles ne soient spécifiques au cadmium, la DGCCRF (2025) diffuse également des recommandations au consommateur quant aux réflexes à retenir pour ne pas faire un mauvais usage des MCDA.

Tableau 19. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec les denrées alimentaires, EDCH et MCDA

PRATIQUES ET TECHNIQUES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Denrées alimentaires			
Sensibilisation du grand public afin de réduire son exposition alimentaire au Cd	Fabricants, distributeurs, associations, institutions, consommateurs, pouvoirs publics	Note d'information de la Commission Européenne sur le cadmium dans la consommation de chair brune de crabe adressée aux autorités sanitaires et institutions / associations apportant des informations sur la sécurité sanitaire des aliments (European Commission, 2011) : recommandation de déconseiller aux consommateurs de consommer (ou de limiter leur consommation) de cette partie du crabe où s'accumule le cadmium, en fonction du contexte spécifique à chaque Etat membre. Note de l'OMS sur l'exposition au cadmium (2019) listant brièvement diverses mesures pour réduire l'exposition parmi lesquelles le lavage des fruits et légumes et l'épluchage des racines et tubercules. Recommandations de la Food and Drug Administration (Etats-Unis) pour protéger les jeunes enfants (6- 12 mois) des contaminants de l'environnement, p.ex. varier son alimentation, inclure des aliments riches en fer et en zinc (FDA, 2023). Clean Label Project (CLP, Etats-Unis) : dispositif d'information des consommateurs, émanant de la société civile, incluant un dosage de métaux lourds (vs limites maximales) dans des produits de consommation (Bair, 2022) Publications scientifiques incluant des recommandations à l'échelle des consommateurs, telle que celle de diversifier son alimentation (Schaefer et al., 2020).	Petit guide de l'auto-consommation en toute sécurité (jardinage, pêche, chasse et cueillette) publié sur le site du Ministère de la santé , incluant une recommandation de ne pas consommer le tortillon des bulots (Ministère de la Santé et de la Prévention, 2023).

Sensibilisation des acteurs concernés par des sites pollués au cadmium quant à la consommation locale de denrées alimentaires et d'eau	Fabricants, distributeurs, associations, institutions, consommateurs, pouvoirs publics	<i>Option d'action n'ayant pas fait l'objet d'une recherche documentaire à l'échelle internationale / européenne.</i>	Rapport du Haut Conseil de la Santé Publique (2022) abordant les « mesures de gestion du risque en cas de dépassement des valeurs repères » pour le cadmium dans les sols pollués, notamment concernant la mise sur le marché des produits et les jardins potagers privés . Exemples de recommandations aux habitants de sites pollués par d'autres contaminants (p.ex. l'arsenic, HAS, 2020) soulignant les pratiques à adopter / éviter notamment pour la consommation d'aliments et d'eau.
Technologies de traitement du cadmium dans les denrées alimentaires	Fabricants	Synthèse mentionnant des travaux sur des technologies d'élimination du Cd dans certaines denrées alimentaires (ex. riz, cacao), basées sur des méthodes physiques (ex. lavage, trempage, rinçage), chimiques (ex. retrait du Cd associé aux protéines de riz par dissolution et/ou adsorption, complexation) ou de fermentation microbienne (Genchi et al., 2020 ; Wang et al., 2023).	<i>Pas de mesure spécifique identifiée.</i>
Initiatives volontaires d'amélioration des dispositifs de surveillance et de contrôles de la teneur en cadmium des denrées alimentaires	Fabricants, distributeurs, pouvoirs publics	Démarche "Closer to Zero: Reducing Childhood Exposure to Contaminants from Foods" (Etats-Unis, FDA) incluant diverses initiatives (recherche, surveillance, cibles d'amélioration des taux de conformités, consultation des acteurs encourageant à l'adoption de meilleures pratiques de production / transformation afin de réduire les niveaux de contaminants dans les denrées et produits agricoles (FDA, 2025).	Plateforme de la Surveillance de Chaîne Alimentaire : rapport du groupe de travail multipartenarial sur l'amélioration de la surveillance du cadmium (Plateforme SCA, 2023), prenant appui sur la mutualisation de données issues de 11 dispositifs de surveillance publics et privés, rassemblant près de 75 000 résultats d'analyse de la teneur en Cd dans diverses matrices relatives à l'alimentation humaine (82%) ou animale (18%), sur la période 2010-2019.
Eaux destinées à la consommation humaine			
Techniques de traitement du cadmium dans les eaux de consommation	Producteurs, distributeurs	Directives de qualité pour l'eau de boisson de l'OMS (2017a) indiquant qu'une concentration de 0,002 mg Cd L ⁻¹ devrait pouvoir être atteinte par des techniques d'adoucissement par coagulation ou précipitation. Document guide du Comité canadien sur le cadmium dans l'eau potable détaillant les techniques de traitement / remédiation envisageables (technologies	Techniques de traitement visant à éliminer le cadmium dans les filières de potabilisation , au vu de la concentration maximale tolérable au robinet du consommateur pour le cadmium qui doit être respectée pour les MCDE (cf. 1.1.1.1). Techniques de prévention de la corrosion en ajustant la qualité de l'eau potable,

		en stations de traitement, actions sur les canalisations, techniques applicables à domicile) (Santé Canada, 2020).	Techniques d'élimination du cadmium dans l'eau à domicile (cadmium apporté dans le réseau de distribution (canalisations)).
Matériaux en contact avec les denrées alimentaires (MCDA)			
Bonne pratique de transformation agroalimentaire	Fabricants, transformateurs, consommateurs	Publications scientifiques incluant des recommandations visant à éviter le transfert du cadmium dans les aliments au cours de leur transformation ou stockage . P.ex. selon Schaefer et al. (2020) : - Arrêt de l'utilisation d'ustensiles plaqués en cadmium et d'équipements galvanisés pour la fabrication d'aliments - Réduction de l'usage de stabilisants contenant du cadmium dans les matières type plastiques - Élimination de l'émail de poterie à base de cadmium sur les ustensiles de cuisine	Recommandations générales de la DGCCRF (non spécifiques au cadmium) à l'attention des consommateurs, sur les réflexes à retenir concernant les matériaux en contact avec les denrées alimentaires au cours de la cuisson ou du stockage des aliments (DGCCRF, 2025c).

6.3.1.3 Conclusion sur l'identification de mesures concernant les denrées alimentaires, les eaux destinées à la consommation humaine et les MCDA

Considérant le fait que :

- L'ingestion d'aliments est la source majoritaire d'imprégnation de la population générale française fumeuse et non fumeuse (pouvant atteindre une contribution de 98% pour la population générale non fumeuse selon l'âge, cf. chapitre 5).
- Hors tabagisme, l'alimentation est la voie majeure d'exposition humaine au cadmium.
- Les aliments contributeurs majeurs à l'imprégnation humaine au cadmium identifiés sont les denrées agricoles d'origine végétale (pommes de terre, légumes), produits céréaliers transformés et les produits de la mer.
- En France, au regard des résultats des contrôles réalisés, la contribution seule des MCDA à l'exposition au cadmium du consommateur apparaît comme faible.
- Les principaux contributeurs à l'exposition alimentaire au cadmium sont pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base.

De fait, le GT considère que les leviers d'action majeurs sur la problématique du cadmium dans l'alimentation se situent en amont de la contamination des denrées alimentaires pour agir sur leur qualité. Ainsi, il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés qui seraient spécifiques au cadmium.

Toutefois, le GT recommande une alimentation diversifiée, en variant les sources d'approvisionnement, afin de couvrir les besoins nutritionnels et pour éviter l'éventuelle exposition répétée au cadmium en raison de la consommation régulière d'une denrée provenant d'une source d'approvisionnement unique.

Le GT relève plusieurs enjeux liés au cadmium apporté par l'alimentation :

- L'intérêt d'agir sur les **TM réglementaires** pour les **principaux aliments contributeurs** à l'exposition au cadmium de la population générale du fait de leur niveau de contamination et d'une consommation fréquente ou élevée (p. ex. denrées alimentaires d'origine végétale (pommes de terre, légumes, produits céréaliers).
- L'existence de recommandations d'amélioration de **la surveillance et du contrôle** du cadmium dans les denrées alimentaires identifiées par la plateforme SCA (2023) en matière d'échantillonnage, d'analyse, d'exploitation des données et de collaboration.
- L'intérêt d'une action **en amont sur les sources et voies de contamination** en cadmium des principaux aliments contributeurs **qui sont essentiellement produits en France** (ex. pommes de terre, céréales, légumes⁶⁰), en particulier au niveau des intrants agricoles de type engrais minéraux phosphatés et autres fertilisants à l'origine de la contamination des sols agricoles en cadmium, et au niveau des pratiques agricoles (les options d'action seront abordées dans la section 6.3.2).

⁶⁰ Le GT observe, à cet égard, que tous usages confondus, les céréales produites en France constituent de loin la plus grande part des céréales consommées en France en regard des quantités importées. C'est également le cas, dans une moindre mesure, pour la pomme de terre (FranceAgriMer, 2024, 2025).

Par conséquent, dans le chapitre 7, le GT souhaite approfondir par une analyse ciblée les options d'action sur les denrées alimentaires, notamment :

- La **redéfinition, sur le plan sanitaire, des TM en cadmium dans les aliments** qui n'entraînent pas de dépassement de la valeur toxicologique de référence interne (VTR interne) dans la population.
- L'opportunité d'**autres actions spécifiques** visant les forts consommateurs de **denrées alimentaires très contaminées** et/ou **de denrées qui dépassent fréquemment les TM**. Le GT souligne que certaines de ces denrées n'ont pas pu être intégrées à sa modélisation de l'exposition agrégée (chapitre 5) (par exemple : certains produits de la mer), faute de données disponibles. Ces denrées, qui sont susceptibles d'être très contaminées, peuvent faire l'objet d'une stratégie spécifique (ex. ne pas consommer le tortillon des bulots).

6.3.2 Mesures concernant les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles, la pêche

Dans la présente section, le GT identifie diverses mesures visant les conditions de prélèvement (ex. pêche) ou de production (agricole, aquacole) des denrées contribuant à l'exposition de la population au cadmium. La recherche documentaire indique une grande diversité d'options pour agir en amont de la contamination des denrées alimentaires, notamment sur les intrants et pratiques agricoles. Ces options font l'objet de réglementations, d'études et de travaux scientifiques et, pour certaines, de controverses.

Pour rappel, d'une part, l'analyse des sources et voies d'exposition au cadmium présentée dans le chapitre 4 indique que la concentration en cadmium dans le fond pédo-géochimique naturel varie en fonction de la roche mère, conduisant les sols agricoles de certaines régions françaises à des concentrations en cadmium fondamentalement plus élevées. La gestion de ces sources de cadmium peut s'avérer plus problématique que celle des contaminations anthropiques puisqu'il n'est pas possible de réduire ou supprimer ces apports, et parce que les concentrations élevées ne sont pas limitées aux seuls horizons superficiels, mais à la couche géologique qui affleure (McLaughlin et al., 2021) (cf. section 4.1).

D'autre part, l'apport d'engrais minéraux phosphatés et aussi d'autres matières fertilisantes comme les effluents d'élevage et les boues de station d'épuration, constituent les principales sources de cadmium d'origine anthropique dans les sols agricoles français. Ces apports peuvent varier selon la nature, l'origine, la composition et la quantité des matières fertilisantes apportées, en fonction des types de cultures ou d'élevage pratiqués et, par conséquent, en fonction des régions (cf. section 4.2).

Tel que cela a été souligné dans un précédent rapport de l'Anses (2019), différentes actions sont donc envisageables, notamment pour réduire la **concentration en cadmium des intrants agricoles utilisés, modifier les types ou quantités d'intrants** source de cadmium apportés aux sols, pour **limiter le transfert de cadmium** du sol vers la plante ou encore pour limiter des transferts par érosion ou ré-envol de particules de sol pollué (couverts végétaux, chaulage, apports de matières organiques).

Il convient de noter que ces diverses mesures peuvent s'inscrire dans une **réflexion plus globale** sur l'évolution des **modèles et des pratiques agricoles** à moyen ou long terme, au regard d'une diversité d'enjeux environnementaux, de sécurité alimentaire et sanitaire. Cela implique notamment de tenir compte de la raréfaction de ressources non-renouvelables actuellement utilisées comme intrants agricoles, à l'instar du phosphate minéral, qui peut constituer par ailleurs une source importante d'apport en cadmium dans les sols (Cordell et al., 2009). Ces enjeux ont par exemple été évoqués dans le volet agricole de la feuille de route « Economie circulaire », qui entend promouvoir une réduction des usages de ressources finies, les pertes et gaspillages au niveau de la production primaire, tout en mobilisant des fertilisants issus de ressources plus renouvelables (ex. déchets alimentaires, déchets verts, effluents organiques agricoles et industriels) et en veillant à la préservation de la qualité des sols (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2019).

Cette section vise à identifier des actions déjà appliquées ou envisageables en lien avec les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles ou la pêche. Dans un premier temps des réglementations et normes, françaises ou internationales, sont présentées. Dans un second temps des pratiques et techniques, pour prévenir ou maîtriser *in fine* la contamination des denrées agricoles, sont identifiées. Enfin, le GT pointe des options d'action pour lesquelles il lui apparaît utile d'apporter un éclairage complémentaire dans le contexte français.

6.3.2.1 Réglementation et normes

Un certain nombre d'options d'action relèvent de réglementations et de normes visant les secteurs agricoles, aquacoles ou la pêche (cf. **Tableau 20**).

- *Fabrication et commercialisation des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC)*

Tout d'abord, des **limites en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture** (MFSC) ont été fixées au niveau européen en 2019 par le règlement UE 2019/1009 relatif à l'harmonisation de la réglementation des fertilisants sur le marché européen. Ce règlement, mis en application depuis le 16 juillet 2022, adopte pour les engrais minéraux phosphatés une concentration limite de **60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅**. Cette valeur a fait l'objet de débats, notamment compte-tenu de résultats d'études contrastés quant à l'impact d'une réduction des limites en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés sur le niveau de contamination des sols agricoles à long terme (voir p.ex. Science.org, 2018). Différents travaux et propositions ont souligné l'intérêt d'un seuil moins élevé, comme appliqué dans certains pays européens, avant l'introduction de ce règlement. Il est prévu que la Commission Européenne réévalue la mise en application et l'incidence de ce règlement en 2026, incluant un réexamen des valeurs limites en cadmium des engrais minéraux phosphatés, « en vue de déterminer s'il est possible de réduire ces valeurs limites à un niveau approprié sur la base des technologies et des données scientifiques disponibles en ce qui concerne l'exposition au cadmium et son accumulation dans l'environnement » (article 49). Par ailleurs, il convient de noter que ce règlement UE 2019/1009 ne s'applique, pour un produit, que dans le cadre de l'évaluation volontaire de sa conformité en vue d'obtenir un marquage CE. Le marquage CE permet ensuite une mise à disposition de ce produit sur le marché européen. Pour les produits n'ayant pas d'obligation d'être conforme à ce règlement, la mise sur le marché d'un produit, en conformité avec le droit national ou les règles générales de libre circulation du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne reste donc possible⁶¹.

Par conséquent, les réglementations nationales peuvent appliquer une limite en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés plus ou moins élevée que la limite à l'échelle de l'UE (60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) (Sterckeman, 2018a, Ulrich, 2019). En **France**, la **concentration limite en cadmium** qui s'applique dans les matières fertilisantes varie **selon la voie de mise sur le marché choisie**. Par exemple, pour les engrais minéraux phosphatés, elle est de 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ selon le règlement UE 2019/1009 (marquage CE) ou de 90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ selon la norme française (NF U42-001-1). Cependant, les modélisations basées sur des bilans de masse effectuées récemment (Sterckeman et al., 2018 ; Carne et al., 2021) concluent à une nécessité de concentrations en cadmium plus basses que les limites actuelles afin de diminuer la contamination en cadmium des sols et des denrées alimentaires, et ainsi préserver la santé du consommateur. De précédents travaux de l'Anses recommandent ainsi de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ pour l'ensemble des matières fertilisantes et de réduire la limite à une concentration en cadmium égale ou inférieure à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ dans les engrais minéraux phosphatés et 1 mg kg⁻¹ de matière sèche pour les matières fertilisantes d'origine organique (MAFOR), pour respecter ce flux (Anses, 2019a, 2021).

⁶¹ Différentes procédures existent : demande d'AMM, conformité à une norme, demande de reconnaissance mutuelle ou de permis d'introduction... Voir : <https://www.entreprises.gouv.fr/espace-entreprises/s-informer-sur-la-reglementation/matieres-fertilisantes-et-supports-de-culture>

Par ailleurs, la concentration en cadmium dans les effluents d'élevage et les apports en cadmium *via* leur épandage ne sont pas réglementés si ces effluents sont épandus sur les terres des propriétaires des animaux qui les ont produits (Anses, 2019a). En raison des transferts possibles vers les eaux souterraines et superficielles, et les autres parcelles, et par conséquent, du risque augmenté de pollution diffuse du cadmium, des options d'action pourraient être envisagées à ce niveau compte-tenu des conséquences éventuelles en termes de santé publique (cf. 6.3.2.2, sensibilisation / formation des exploitants agricoles).

En France, un projet de réglementation visant à encadrer la qualité et l'innocuité des MFSC a été porté en consultation publique fin 2023. Il prévoit de réviser la limite en cadmium de plusieurs intrants agricoles. Au moment de la rédaction du présent rapport, sa date de publication n'a pas été annoncée (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023).

En compléments de limites en cadmium dans les intrants agricoles, des **mesures économiques incitant au développement de solutions pour réduire le cadmium dans les MFSC** ont été identifiées (ex. taxe sur le cadmium dans les engrais minéraux phosphatés instaurée en Suède en 1994, puis abrogée en 2009) (Drake et Hellstrand, 1998, Andersen, 2022). L'intérêt éventuel de ce type d'action est abordé dans le chapitre 7 (cf. 7.3.2.2.2).

En matière d'**étiquetage des matières fertilisantes**, le règlement UE 2019/1009 prévoit la possibilité d'utiliser l'allégation « faible teneur en cadmium » lorsqu'un engrais organo-minéral a une concentration en cadmium égale ou inférieure à 20 mg kg⁻¹ P₂O₅. Cela est donc possible, en France, si le produit est mis sur le marché sous marquage CE. Si tel n'est pas le cas, la réglementation française de l'étiquetage (décret du Ministère de l'économie n°80-478 du 16 juin 1980) ne prévoit pas, actuellement, l'indication des concentrations en cadmium sur l'étiquette des matières fertilisantes. Toutefois, les fabricants doivent s'assurer que les préconisations de dose d'utilisation des produits ne dépassent pas les flux maximaux de cadmium dans les sols agricoles, lorsque la réglementation associée à la voie de mise sur le marché choisie en propose.

Enfin, il convient de noter que la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) met en œuvre un **plan de contrôle sur les matières fertilisantes et supports de culture**. Elle constate globalement des manquements persistants par rapport à diverses obligations réglementaires (défauts sur la quantité d'éléments fertilisants, dépassements des limites en contaminants, anomalies d'étiquetage).

- Usage agricole des MFSC

De façon générale, il n'existe pas de limite réglementaire de concentration en cadmium dans les sols agricoles. Toutefois, des **normes d'épandage** des boues de STEP, des digestats de méthanisation et des cendres **en fonction de la concentration totale en cadmium dans les sols agricoles** ont été identifiées aux échelles européenne ou française. Cela permet d'éviter un enrichissement en éléments inorganiques persistants et (éco)toxiques tels que le cadmium dans les sols. Par exemple, selon l'arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles, une valeur de 2 ppm de cadmium dans le sol (2 mg kg⁻¹ de matière sèche) ne permet pas d'apporter des boues de STEP qui contiennent du cadmium. En France, l'Anses (2019, 2021) a déjà souligné la nécessité de caractériser les sols avant l'épandage. Plus globalement, Marini et al. (2020) indiquent que plusieurs propositions d'une directive cadre européenne sur les sols (2007-2009) ont été rejetées par une minorité d'Etats Membres (Allemagne, France, Autriche, Pays-Bas,

Royaume-Uni) sur la base des principes de subsidiarité et de proportionnalité, de coûts excessifs, du fardeau administratif, et d'arguments techniques concernant la délimitation des domaines à risque. Une proposition de nouvelle Directive sur la surveillance des sols a toutefois été adoptée par le Conseil de l'UE en septembre 2025⁶². Il prévoit l'établissement de valeurs visant à prioriser et mettre en œuvre des mesures de gestion à caractère sanitaire des sols.

Par ailleurs, la réglementation européenne par sa Directive 86/278/CEE relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture, inclut des **valeurs de flux maximal en cadmium dans les sols agricoles** (apport < 150 g Cd ha⁻¹ an⁻¹). En France, l'arrêté du 1^{er} avril 2020 s'appuie sur le guide de l'Anses (2020) relatif à l'évaluation des dossiers de demande d'AMM pour les MFSC qui indique un flux maximal annuel moyen sur 10 ans de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹. Un projet de réglementation française devrait introduire par ailleurs un apport maximal annuel moyen admissible de 2 à 5 g Cd ha⁻¹ an⁻¹, en fonction des MFSC (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023). Ceci serait un peu moins restrictif que la recommandation de l'Anses qui porte sur un flux annuel d'apport en cadmium n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature (engrais/ amendement, origine organique / minéral...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole.

- *Gestion des sols agricoles et zones aquacoles polluées*

La présente auto-saisine étant centrée sur l'exposition agrégée et la priorisation de leviers d'action à l'échelle de la population générale, ce rapport se concentre sur les options d'action visant les pollutions diffuses impactant la population générale. Il tient néanmoins à souligner les enjeux d'une **prévention des risques localisée** pour des publics fréquentant ou résidant à proximité de sites et sols pollués et rappelle, à ce titre, les leviers d'action généralement mobilisés ou préconisés (cf. **Tableau 20**, **Tableau 21** et annexe 6).

- *Autres mesures*

Enfin, dans un cadre « One Health », d'autres mesures visant à réduire les apports ou transferts de cadmium dans le secteur agricole ont été identifiées. C'est le cas de **limites en cadmium dans les aliments destinés aux animaux d'élevage**, afin de limiter son transfert dans la chaîne alimentaire. Il existe également une **valeur guide de l'OMS sur la teneur en cadmium dans l'air** qui a été établie afin de prévenir l'augmentation des flux dans les sols agricoles (WHO, 2000).

Plus généralement, le GT indique que la mise en œuvre de mesures réglementaires doit s'accompagner de **dispositifs de contrôle et de surveillance** adaptés, afin de pouvoir documenter les écarts à la conformité et proposer des actions correctives. A l'issue de ce travail d'identification d'options d'action, peu d'informations ont été identifiées pour documenter le respect et les impacts des concentrations maximales en cadmium dans les intrants agricoles, le respect et les impacts du flux maximal d'apport en cadmium dans les sols par les MFSC, ou plus globalement le suivi dans le temps de la qualité des sols agricoles et des zones aquacoles.

⁶² <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils/>

Tableau 20. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles et la pêche

REGLEMENTATION OU NORMES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Fabrication et commercialisation des MFSC			
Limites en cadmium dans les MFSC	Fabricants de MFSC, exploitants agricoles	Règlementation européenne sur la commercialisation et les usages des fertilisants incluant des valeurs limites en cadmium (Règlement EU 2019/1009, entrée en application en 2022) : Engrais inorganique à macroéléments de type « engrais phosphaté » : 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ Engrais organique : 1,5 mg Cd kg⁻¹ MS Engrais organo-minéral : 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ si P₂O₅ ≥ 5%, 3 mg Cd kg⁻¹ MS si P₂O₅ < 5% Engrais inorganique à oligoéléments : 200 mg Cd kg⁻¹ de teneur totale en oligoéléments Amendement minéral basique : 2 mg Cd kg⁻¹ MS Amendement organique du sol : 2 mg Cd kg⁻¹ MS Amendement inorganique du sol : 1,5 mg Cd kg⁻¹ MS Support de culture : 1,5 mg Cd kg⁻¹ MS Biostimulant des végétaux : 1,5 mg Cd kg⁻¹ MS Règlementation européenne appliquée aux MFSC autorisées dans la production biologique incluant également des valeurs limites en Cd pour le mélange composté ou fermenté de déchets ménagers, le phosphate naturel tendre, le phosphate aluminocalcique, les sédiments anaérobies riches en matières organiques (Règlement d'exécution UE 2021/1165, Annexe II). Directive européenne relative à la protection de l'environnement et notamment des sols incluant une valeur limite de concentration en cadmium dans les boues destinées à l'utilisation en agriculture (86/278/CEE) : 20 à 40 mg Cd kg⁻¹ MS	Normes françaises (NF) relatives aux concentrations limites en Cd dans les MFSC commercialisées : Engrais minéraux (U42-001-1) : 90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ Engrais organiques (42-001-2) : 3 mg Cd kg⁻¹ MS Engrais organo-minéraux (42-001-3) : 90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ si P₂O₅ ≥ 5%, 5mg/kg MS si P₂O₅ < 5% Amendements organiques (P₂O₅ < 5%) (44-051, 44-095) : 3 mg Cd kg⁻¹ MS Amendements minéraux (P₂O₅ < 5%) (44-001) : entre 1,5 et 41 mg Cd kg⁻¹ MS Supports de culture (NF U44-551/A3) : 2 mg Cd kg⁻¹ MS Arrêté du 01/04/20 fixant la composition des dossiers de demandes relatives à des AMM et permis de matières fertilisantes, d'adjuvants pour MFSC renvoyant au guide relatif à l'évaluation des dossiers de demande relative à une AMM ou un permis (Anses, 2020d) : concentration maximale en cadmium de 1 mg Cd kg⁻¹ MS. Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles incluant, à compter de 2004, une valeur limite de cadmium dans les boues à 10 mg Cd kg⁻¹ MS. Arrêté du 02/02/98 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation, fixant des concentrations limites en cadmium dans les déchets ou effluents de 10 mg Cd kg⁻¹ MS.

			Arrêté du 03/08/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE fixant des teneurs limite en Cd dans les cendres de 10 mg Cd kg⁻¹ MS. Arrêté du 8/8/19 relatif au cahier des charges pour l'utilisation de digestats de méthanisation agricole en tant que matières fertilisantes, fixant une TM en Cd de 1,5 mg Cd kg⁻¹ MS. Projet de réglementation introduisant une TM en Cd pour divers types de MFSC, notamment pour les engrais minéraux phosphatés (60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ si P₂O₅ ≥ 5%) et les engrais organiques (1,5 mg Cd kg⁻¹ MS) (catégorie A1) (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023).
Incitations économiques au développement de solutions pour réduire le cadmium dans les MFSC	Financeurs en recherche et innovation, fabricants et distributeurs de MFSC, pouvoirs publics	Taxe imposée en Suède en 1994 à hauteur de 30 SEK (3€) / g Cd (sous réserve d'un seuil minimal de 5 g Cd / tonne de phosphore dans l'engrais), abolie en 2009 (Andersen, 2022). Réglementation européenne évoquant la nécessité d'inciter au développement de technologies de décadmiation économiquement viables à l'échelle industrielle et de gestion des déchets riches en cadmium (ex. via le programme Horizon Europe, la plateforme de soutien du financement de l'économie circulaire, ou par l'intermédiaire de la Banque européenne d'investissement) (Règlement EU 2019/1009, considérant 13).	Intentions des pouvoirs publics de promouvoir la mobilisation de fertilisants issus de ressources renouvelables (ex. déchets alimentaires, déchets verts, effluents organiques agricoles et industriels) moins contaminés en cadmium via le volet agricole de la feuille de route économie circulaire (FREC), des dispositifs d'aide en ce sens (ex. via ADEME) et le projet de décret « Socle commun » en préparation.

Etiquetage obligatoire relatif au cadmium dans les MFSC mises sur le marché	Distributeurs de MFSC	Règlementation européenne sur la commercialisation et les usages des fertilisants incluant des exigences en matière d'étiquetage applicables aux fertilisants UE, notamment celle de fournir toute information pertinente relative aux mesures recommandées afin de gérer les risques pour la santé humaine, animale ou végétale, la sécurité ou l'environnement (Règlement EU 2019/1009 – Annexe III, entrée en application en 2022). En Nouvelle-Zélande, une recommandation scientifique d'indiquer le contenu en Cd sur l'étiquette des engrais minéraux phosphatés a été écartée par le <i>Cadmium Management Group</i> pour des raisons techniques et logistiques (Sneath, 2020)	Arrêté du 1/4/20 (fixant la composition des dossiers de demandes relatives à des AMM et permis de matières fertilisantes, d'adjuvants pour MFSC) renvoyant au guide relatif à l'évaluation des dossiers de demande relative à une AMM ou un permis (Anses, 2020d) selon lequel pour tous les produits contenant du Cd, la concentration en Cd doit être mentionnée sur l'étiquette. Etiquetage des MFSC encadré par le décret 80-478 du 16 juin 1980 portant application de l'article L. 412-1 du code de la consommation en ce qui concerne les matières fertilisantes et les supports de culture : pas d'indication prévue des concentrations en cadmium sur l'étiquette.
Etiquetage volontaire relatif au cadmium dans les MFSC mises sur le marché	Distributeurs d'engrais minéraux phosphatés	Règlement EU 2019/1009 , Annexe III : étiquetage volontaire « faible teneur en cadmium » sur un engrais organo-minéral ayant une concentration en cadmium $\leq 20 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$	Etiquetage des MFSC encadré par le décret 80-478 du 16 juin 1980 ne prévoyant pas d'étiquetage volontaire en lien avec le Cd.
Usage agricole des MFSC			
Normes d'épandage en fonction du cadmium dans les sols agricoles	Ouvrages de traitement des eaux usées, exploitants agricoles	Directive européenne relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, incluant une valeur limite de concentration en cadmium dans les sols (86/278/CEE, annexe IA): $< 1 \text{ à } 3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$ (sols dont le pH est de 6 à 7, autorisations de dépassement sous conditions) Absence de législation européenne sur les sols, projet de directive abandonné en 2014 (Marini et al., 2020); mais proposition de nouvelle Directive sur la surveillance des sols adoptée par le Conseil de l'UE (2025), devant définir « des descripteurs du sol communs » et introduire « des classes permettant de décrire la santé des sols », associées à « des valeurs cibles non contraignantes au niveau de l'UE et (...) des valeurs de déclenchement nationales », ces dispositions devant « aid[er] les États membres à définir les priorités et à mettre progressivement en œuvre des mesures conduisant à des sols plus sains ».	Arrêté du 2/2/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE, et arrêté du 08/01/98 interdisant l'épandage de boues sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols ($2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$). Synthèse annuelle adressée par le producteur de boues au service chargé de la police de l'eau et aux utilisateurs. Arrêté du 3/8/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE interdisant l'épandage de cendres sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols ($2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$). Arrêté du 12/8/10 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation interdisant l'épandage de digestats sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols ($2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$).

		Nouvelle-Zélande : Lignes directrices pour l'application sûre de biosolides fixant une limite de 1 mg Cd kg ⁻¹ (Gray et Cavanagh 2022).	
Flux maximal en cadmium dans les sols agricoles	Fabricants de fertilisants, exploitants agricoles	Directive européenne relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (86/278/CEE), incluant une valeur limite de quantités annuelles de cadmium pouvant être introduites dans les sols cultivés (sur la base d'une moyenne sur 10 ans) : apport < 0,15 kg Cd ha ⁻¹ an ⁻¹ .	Arrêté du 1/4/20 fixant la composition des dossiers de demandes relatives à des AMM et permis de matières fertilisantes, d'adjuvants pour MFSC renvoyant au guide relatif à l'évaluation des dossiers de demande relative à une AMM ou un permis (Anses, 2020d) : - Flux maximal annuel moyen sur 10 ans : 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ - Flux maximal par apport (renouvelable tous les 3 ans) : 6 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ Normes françaises (NF) relatives au flux maximal de Cd apportés aux sols agricoles par des MFSC : - Engrais organique (42-001-2), engrais organo-minéral (42-001-3), amendements (44-001, 44-003, 44-051, 44-095, 44-295) : - o Flux maximal sur 10 ans : 150 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ - o Flux maximal par an : 45 g Cd ha⁻¹ Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles fixant un flux maximal cumulé en 10 ans de 0,015 g Cd m² Arrêté du 02/02/98 modifié relatif aux émissions de toute nature des ICPE, fixant un flux cumulé maximum en 10 ans apporté par les déchets ou effluents pour les pâturages ou les sols de pH inférieur à 6, de 0,015 g Cd m² Arrêté du 03/08/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE fixant un flux cumulé maximum de Cd apporté dans les cendres en 10 ans de 0,015 g Cd m². Arrêté du 12/8/10 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation fixant un flux cumulé maximum de Cd apporté par les digestats pour les pâturages ou les sols de pH inférieur à 6, en 10 ans, de 0,015 mg Cd m².

			Arrêté du 8/8/19 relatif au cahier des charges pour l'utilisation de digestats de méthanisation agricole en tant que matières fertilisantes, exigeant que l'utilisateur en fasse un apport raisonné afin de respecter : - Flux maximal annuel moyen sur 10 ans : 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ - Quantité maximale par année : 6 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ Projet de réglementation introduisant un apport maximal annuel moyen admissible de 2 à 5 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ en fonction des MFSC (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023).
Gestion des sols agricoles pollués			
Restrictions des usages de sols agricoles pollués	Exploitants agricoles, distributeurs de denrées alimentaires	Proposition de nouvelle Directive sur la surveillance des sols adoptée par le Conseil de l'UE (2025, voir <i>supra</i>).	Restrictions visant la valorisation des denrées produites sur des sols pollués, p.ex. en Région Hauts-de-France : - Arrêté préfectoral interdépartemental du 29/5/15 relatif à des restrictions sanitaires d'utilisation et de mise sur le marché de productions agricoles végétales issues des zones reconnues contaminées par des métaux lourds. - Arrêté préfectoral interdépartemental du 29/5/15 relatif à des restrictions de mise sur le marché de productions agricoles d'origine animale issues des zones reconnues contaminées par des métaux lourds.
Activités aquacoles et de pêche			
Restrictions sur des activités aquacoles et de pêche en raison du cadmium	Exploitants, pêcheurs, distributeurs	<i>Option d'action n'ayant pas fait l'objet d'une recherche documentaire à l'échelle internationale / européenne.</i>	Arrêté du 6 novembre 2013 relatif au classement, à la surveillance et à la gestion sanitaire des zones de production et des zones de reparcage de coquillages vivants, impliquant qu'en cas dépassement des teneurs maximales en Cd établies dans le règlement (CE) n° 1881/2006, les zones ne peuvent pas être classées et la récolte des coquillages y est interdite (pas de seuil réglementaire pour les gastéropodes). Interdiction de la récolte de coquillages dans l'Estuaire de la Gironde depuis 1995 pour la consommation immédiate, le reparcage et la purification (Duval et al., 2024).

			- 2010 : autorisation de l'activité de captage de naissain (huître juvénile de taille < 1,5 cm) dans la baie de Bonne Anse ; - 2014 : autorisation de récolte et de mise sur le marché des huîtres après passage en bassin de purification dans les bassins du Nord Médoc.
Autres mesures			
Teneurs maximales en cadmium dans les produits destinés à l'alimentation animale	Fabricants de produits destinés à l'alimentation animale	Réglementation européenne (Directive n°2002/32/CE) fixant des teneurs maximales autorisées pour le Cd dans l'alimentation animale , incluant des TM en cadmium (en mg kg ⁻¹ (ppm) d'aliments d'une teneur en humidité de 12%) : matières premières d'origine animale / végétale (1-2 ppm), additifs, aliments complémentaires, aliments complets avec diverses TM et des exceptions.	Arrêté du 12 janvier 2001 (modifié) fixant les teneurs maximales pour les substances et produits indésirables dans l'alimentation des animaux , incluant des TM en cadmium (en mg kg ⁻¹ (ppm) d'aliments d'une teneur en humidité de 12%) : matières premières d'origine animale / végétale (1-2 ppm), additifs, aliments complémentaires, aliments complets avec diverses TM et des exceptions.
Normes en cadmium dans l'air	Pouvoirs publics	Voir la réglementation sur la qualité de l'air dans la section 6.3.3.1 et le Tableau 22.	Voir la réglementation sur la qualité de l'air dans la section 6.3.3.1 et le Tableau 22.

AMM : autorisations de mise sur le marché ; MFSC : matières fertilisantes et supports de culture ; MS : matière sèche

6.3.2.2 Pratiques et techniques

Les pratiques et techniques identifiées par le GT concernent, en amont, les choix d'approvisionnement en matières premières pour la fabrication ou la valorisation des intrants agricoles ou, en aval, la gestion des sols agricoles et l'utilisation de MFSC (**Tableau 21**).

Plus généralement, le GT souligne, d'une part, que la **réduction à la source des apports de cadmium** apparaît cruciale dès que la solution est réalisable (techniquement et économiquement). Comme pour les boues de STEP, trois mesures de précaution pourraient être mise en place pour l'ensemble des MFSC commercialisées et aussi générées par l'économie circulaire, en visant : la qualité du produit, les flux, et les analyses de sol et végétaux pour vérifier l'impact des apports au sol.

- *Fabrication et distribution des MFSC*

La réglementation des ICPE impose l'usage des meilleures techniques disponibles (MTD) pour réduire les risques environnementaux et sanitaires, dans une logique d'amélioration continue. Il semble donc indispensable de mettre en place une démarche de réduction de la concentration en cadmium des MFSC utilisées.

Tout d'abord, **un approvisionnement en roche phosphatée à moindre concentration en cadmium** permet de fabriquer et de commercialiser des engrais minéraux phosphatés moins riches en cadmium. Or, en France, les roches phosphatées utilisées dans la fabrication des engrais commercialisés proviennent principalement de gisements sédimentaires situés au Maroc ou en Algérie (Anses, 2018c), dans lesquels la concentration en cadmium est plus élevée que dans d'autres gisements (p.ex. en Afrique du Sud ou en Russie) (Nino-Savala et al., 2019, Kubier et al., 2019).

Par ailleurs, la possibilité de recourir à des **procédés industriels de fabrication d'engrais minéraux phosphatés à moindre concentration en cadmium**, tels que la décadmiation appliquée à l'acide phosphorique, a fait l'objet de quelques travaux, notamment co-financés par l'industrie (p.ex. Kouzbou et al., 2019, 2022⁶³). Une précédente note d'AST de l'Anses (2021) relative à la recommandation de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la contamination des sols et des productions et l'exposition de la population humaine soulignait d'ailleurs que « les procédés de décadmiation existants méritent d'être développés et mis en œuvre ».

Un contexte réglementaire contraignant peut encourager des améliorations, comme l'illustrent les **techniques de remédiation appliquées aux boues** (Philippon, 2020). La concentration en éléments trace métalliques dans les boues de stations de traitement des eaux usées (STEU) en France sont inférieures aux seuils réglementaires et, dans le cas du cadmium, la concentration moyenne a été environ divisée par trois entre 1993 et 2009 (Houot et al., 2014). Dans une précédente expertise, l'Anses (2018, p.171) constatait néanmoins qu'il y avait peu de travaux sur les traitements des matières fertilisantes d'origine organique (MAFOR) et sur l'évaluation des risques relatifs à leur usage. L'agence constatait que la composition de ces fertilisants en termes de contaminants était variable et pointait la nécessité de développer la recherche sur ces intrants. Un développement de connaissances apparaît donc nécessaire

⁶³ Thèse (Université Hassan II, Université Clermont-Auvergne) ayant bénéficié du financement de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP, Maroc) et de la Fondation OCP dans le cadre du programme R&D Initiative – Appel à Projets autour des Phosphates APPHOS et de CAMPUS FRANCE (programme bilatéral France - Maroc).

sur la concentration en cadmium des MAFOR en France, la diversité de leurs usages et conséquences sur le transfert de cadmium dans les sols, les plantes (cultures, prairie) et les animaux. Il est rappelé que la plus grande part des volumes de MAFOR épandus sur les sols agricoles en France sont des effluents d'élevage.

- *Pratiques agricoles*

Par ailleurs, diverses **pratiques et techniques agricoles** peuvent faire varier la **disponibilité en cadmium dans les sols** et son **transfert du sol vers la plante**. Ainsi, parmi les pratiques préventives citées dans la littérature figurent la réalisation d'analyses régulières des sols, le choix de cultivars capables d'accumuler moins de cadmium, et des adaptations ou le remplacement des pratiques de fertilisation (cf. **Tableau 21**). De précédentes expertises de l'Anses (2018, 2021) soulignent que si certaines pratiques peuvent permettre d'adsorber à court terme le cadmium (ex. chaulage⁶⁴, apport de matières organiques, phytostabilisation), elles ne constituent pas une solution durable et pérenne, et ne peuvent se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles. Par ailleurs, il convient de noter que l'apport d'engrais minéraux phosphatés est autorisé en agriculture biologique (AB), par exemple sous forme de phosphate naturel tendre ou de phosphate aluminocalcique (Règlement d'exécution UE 2021/1165, Annexe II). Pour ces intrants, les concentrations limites en cadmium sont les mêmes que celles figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 relatif à l'harmonisation de la réglementation des fertilisants sur le marché européen (60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅). Ainsi, en l'état, sauf à reconsidérer le cahier des charges de l'agriculture biologique (AB), celle-ci est potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium. Dans l'EAT3 (Anses, 2026), il est d'ailleurs constaté que, dans la mesure où les résultats des tests statistiques ne sont pas convergents, il n'est pas possible de conclure quant à une différence entre les concentrations en cadmium entre les aliments bio et conventionnels. En plus des pratiques agricoles, il convient de rappeler que le cadmium est naturellement présent dans les sols agricoles, selon la nature de la roche, cultivés en agriculture conventionnelle comme en AB. Cela renforce le besoin de réduction des apports en cadmium sur les sols agricoles.

De surcroît, le GT note des **différences d'accumulation en cadmium** d'une culture à une autre et d'une partie de la plante à une autre, en fonction de leur physiologie (cf. base de données « BAPPET »⁶⁵). Par exemple, la pomme de terre n'apparaît pas comme un aliment dans lequel on trouve des teneurs en cadmium parmi les plus élevées. Elle constitue néanmoins un fort contributeur à l'exposition de la population au cadmium en raison du niveau élevé de sa consommation. Le transfert du cadmium dans le blé est en revanche bien documenté (Vidal, 2024). Toutes ces considérations doivent être intégrées pour penser la priorisation des leviers d'action en prenant en compte à la fois la contamination et la consommation des denrées.

Le GT a noté, à l'échelle internationale et en France, des exemples de **stratégies et outils d'accompagnement des exploitants agricoles à une évolution de leurs pratiques** (innovation organisationnelle). C'est le cas de la stratégie multipartenariale néo-zélandaise de gestion du cadmium pour l'agriculture. Son objectif est de garantir que le cadmium présent dans la production rurale ne présente que des risques minimes pour la santé, le commerce, la

⁶⁴ Le chaulage consiste en des apports d'amendements basiques, telle que la chaux, pour remonter le pH du sol et favoriser la précipitation des métaux (Cd, Pb, Al...).

⁶⁵ <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7740-bappet-base-de-donnees-des-teneurs-en-elements-traces-metalliques-de-plantes-potageres.html>

flexibilité de l'utilisation des terres et l'environnement au cours des 100 prochaines années (Rys, 2020 ; Sneath, 2020 ; Gray et Cavanagh, 2022). La stratégie s'appuie pour cela sur divers dispositifs et outils : accompagnement proposé aux agriculteurs à l'usage d'un système graduel de fertilisation phosphatée, outils de communication.... En France, seul un outil en lien avec le cadmium a été identifié par le GT : l'outil « Bléssûr » de prédiction du risque de non-conformité du blé dur vis-à-vis de sa teneur en métaux lourds, notamment le cadmium (Nguyen et al., 2021). De plus, il ressort des auditions réalisées, le besoin de renforcer les connaissances sur les risques liés au cadmium dans la filière agricole. Il existe en France des dispositifs généraux de formation à la gestion d'exploitations propices à la transmission de connaissances tels que le brevet professionnel de responsable d'entreprise agricole (BPREA) (ONISEP, 2025). En fonction des parcours, une composante obligatoire de formation devrait être ajoutée sur les MFSC et les enjeux sanitaires associés à leur utilisation.

Ceci étant, il convient néanmoins d'insister sur la nécessité de commercialiser des produits dont les conditions d'emploi et l'étiquetage associé permettent aux utilisateurs de respecter les seuils définis en matière de flux de cadmium.

Par ailleurs, la recommandation – lorsqu'elle n'est pas déjà en place – d'analyses régulières des concentrations en cadmium des matières fertilisantes (notamment les effluents d'élevage pouvant être produits au sein même de l'exploitation où ils sont épandus), constitue un levier pour prévenir les transferts excessifs vers les sols agricoles.

Enfin, il est important de souligner la responsabilité partagée que peuvent jouer les conseillers agricoles, les coopératives, ainsi que les distributeurs d'intrants, dans l'accompagnement des agriculteurs vers des pratiques compatibles avec les exigences environnementales.

- *Gestion des sols agricoles pollués*

Enfin, la recension documentaire a permis d'identifier de nombreux travaux relatifs à des **techniques de remédiation des métaux lourds dans les sols pollués**. Les implications de telles techniques appliquées au secteur agricole (applicabilité en champ sur de grandes surfaces, faisabilité économique, durée d'immobilisation des parcelles, ramassage et gestion des résidus de culture enrichis en cadmium, puis étude de la valorisation et/ou de la mise en décharge comme déchets dangereux) devraient toutefois être précisées.

De plus, plusieurs rapports, guides et outils contribuant à **l'identification, la caractérisation et la gestion des sols pollués** en France (usage agricole et jardins) ont été recensés (DGPR 2011, 2017 ; HCSP, 2022). Ces dispositifs sont primordiaux puisqu'ils doivent permettre de détecter et gérer des cas de pollution liée à une source ponctuelle au cadmium causée par des activités passées ou existantes sur certains sites (p.ex. exploitations minières, cas de rejets industriels). Par ailleurs, dans un contexte où les circuits courts d'approvisionnement sont encouragés, il conviendrait de s'assurer au préalable que les sols concernés sont exempts de contamination. En pratique, il n'y a toutefois pas d'obligation pour les producteurs et collectivités de faire des analyses de sols, dont le coût peut être dissuasif (cf. annexe 6).

- *Autres pratiques*

Il est à noter, à l'échelle des particuliers et professionnels, la mise en œuvre depuis janvier 2024 d'une obligation de tri à la source des biodéchets sur le territoire français, pouvant donné lieu à une collecte séparée et un traitement en site dédié (notamment à des fins de méthanisation ou compostage), ou à une gestion de proximité (traitement des biodéchets en

composteurs individuels ou collectifs par les usagers eux-mêmes) (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de la Transition écologique, 2025). Selon la DGCCRF, l'essor de nouvelles pratiques (vente par internet, vente en vrac, recyclage des matières organiques dans le cadre de l'économie circulaire) mérite une attention particulière en termes de contrôle et de surveillance (DGCCRF, 2021b). La réutilisation des eaux usées est également un enjeu à surveiller. Dans ce contexte, il paraît crucial de coupler développement de l'agroécologie, éco-conception et économie circulaire, pour éviter la dispersion des polluants persistants dans l'environnement.

Tableau 21. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles et la pêche

PRATIQUES ET TECHNIQUES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Fabrication et distribution de MFSC			
Utilisation de roche phosphatée à moindre concentration en cadmium pour la fabrication des engrais minéraux commercialisés	Fabricants et importateurs / distributeurs d'engrais phosphatés	Concentration très variable en Cd selon la provenance de la roche phosphatée utilisée pour la fabrication d'engrais minéraux phosphatés (voir p.ex. Nino-Savala et al., 2019 ; Kubier et al., 2019). Selon Kubier et al., concentrations en cadmium / kg P₂O₅ : - Etant peu élevées (<1 - 4 mg kg⁻¹) dans les gisements d'origine ignée (p.ex. en Afrique du Sud, Russie) - Etant variables et pouvant être très élevées (1 - 150 mg kg⁻¹) dans les roches phosphatées issues de dépôts sédimentaires (p.ex. au Maroc, aux Etats-Unis, en Tunisie, au Sénégal ou au Togo).	En France (Anses, 2018c) : - Pas de sites producteurs de phosphates naturels : roches phosphatées importées - Peu d'informations précises disponibles sur la qualité des roches phosphatées ou sur celles des produits transformés (engrais phosphatés). Entre sept. 2017- août 2018, importation de 192 337 tonnes de phosphates de calcium et phosphates alumino-calciques, naturels et craies phosphatées, non-moulus ou moulus provenant majoritairement du Maroc (~75%) et d'Algérie (~20%).
Recours à des processus de fabrication d'engrais phosphatés conduisant à de moindres concentrations en cadmium (p.ex. décadmiation)	Fabricants et distributeurs d'engrais phosphatés	Recours aux technologies de décadmiation indiquée dans le Règlement (UE) 2019/1009 pour réduire la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés. Revue de littérature sur les procédés et enjeux de la décadmiation (p.ex. Kouzbou et al., 2019) : - Réserves de roches phosphatées dans le monde - Présentation de l'industrie des engrais phosphatés (type de produits et procédés de fabrication) - Processus de retrait du Cd de l'acide phosphorique humide (extraction par solvant, adsorption, échange d'ions, précipitation, flottage, usage de membranes).	Etude sur des procédés industriels de décadmiation de l'acide phosphorique, en partenariat avec des partenaires économiques au Maroc, afin d'étudier des techniques de décadmiation des engrais minéraux phosphatés (Kouzbou et al., 2022).

Technologies de remédiation du cadmium dans les MAFOR	Producteurs et transformateurs de MAFOR	Travaux de synthèse sur les techniques de remédiation des éléments traces métalliques dans les eaux usées issues des élevages (Hejna et al., 2021), ou plus largement dans les environnements aquatiques (Carolin et al., 2017).	Evolution de la qualité des boues de STEP en France : depuis l'épandage d'eaux usées brutes sur les sols (avec pour conséquences des pollutions aux métaux lourds et des interdictions de maraîchage, p.ex. à Achères) jusqu'à une amélioration progressive de la qualité des boues par les industriels (ex. voir Philippon, 2020).
Pratiques agricoles			
Pratiques et techniques agricoles faisant varier la disponibilité en cadmium dans les sols et le transfert du sol vers la plante	Acteurs de la recherche académique / privée	Synthèses de connaissances (McLaughlin et al., 2021 ; Schaefer et al., 2020 ; Suci et al., 2022 ; Zhao et al., 2022 ; Mie et al., 2017 ; Rempelos et al., 2021) sur les facteurs influençant le taux de Cd dans les plantes (caractéristiques du sol, génétique de la plante, intrants, eau d'irrigation), pratiques agronomiques préventives : - Analyses régulières de la concentration en Cd dans les sols - Choix de cultivars capables d'accumuler moins de Cd - Adaptation / remplacement des pratiques de fertilisation (type et volume d'engrais) selon la concentration en Cd dans le sol et selon les besoins de la culture pour limiter la disponibilité en cadmium, incluant les pratiques de terrain avec les engrais verts. - Adaptation des amendements pour limiter la disponibilité en Cd (ex. apports de matière organique, chaulage) - Diversification des usages des sols en fonction de la concentration en Cd dans le sol - Adaptation de l'alimentation animale / des conditions de pâturage pour limiter l'exposition des animaux d'élevage au Cd...	Thèse sur la fertilisation soufrée comme levier pour limiter le transfert sol-grain du cadmium chez le blé dur (Vidal, 2024).
Stratégies / outils d'accompagnement des exploitants agricoles à une évolution de leurs pratiques	Exploitants agricoles, instituts techniques et autres acteurs (ex. pouvoirs publics, organismes interprofessionnels)	Exemples de financement de travaux de recherches de formation, et de développement de guides sectoriels , p.ex. pour la prévention et la réduction de la contamination des fèves de cacao par le cadmium dans les pays producteurs (European Commission, 2019, <i>Codex alimentarius</i> , 2022)	Selon l'UNIFA, utilisation d'engrais minéraux phosphatés en baisse depuis 1972 (avec des baisses plus fortes en 2021-2023) en lien avec la diminution des ventes de phosphore en France (Audition dans le cadre de l'expertise de l'Anses, 2018c,d, 2025).

	accompagnant les exploitants	Exemple de la Stratégie nationale de gestion du cadmium pour l'agriculture (Nouvelle-Zélande) dont l'objectif est de garantir que le Cd présent dans la production rurale ne présente que des risques minimes pour la santé, le commerce, la flexibilité de l'utilisation des terres et l'environnement au cours des 100 prochaines années (Rys, 2020, Sneath, 2020, Gray et Cavanagh, 2022) ; Programmes de travail incluant : - Gouvernance - Surveillance des aliments, sols, engrais, environnement - Gestion des engrais, incluant un engagement volontaire des fabricants sur une concentration limite en Cd (280 ppm) - Accompagnement proposé aux agriculteurs à l'usage d'un système graduel de fertilisation phosphatée tenant compte de la contamination en Cd de leurs sols (<i>Tiered Fertilizer Management System - TFMS</i>). - Série d'outils de communication du <i>Cadmium Management group</i> (multipartenarial) à l'attention des professionnels sur le TFMS, sur la culture des céréales du blé, de légumes à feuilles vertes, le pâturage... - Recherche	Outil Bléssûr de prédiction du risque de non-conformité du blé dur vis-à-vis de sa teneur en métaux lourds, développé par INRAE en partenariat avec ARVALIS (Nguyen et al., 2021).
Gestion des sols agricoles pollués			
Technologies, techniques et interventions de remédiation du cadmium dans les sites et sols agricoles pollués	Acteurs de la recherche académique / privée, producteurs agricoles, prestataires, pouvoirs publics	Synthèses sur des techniques de phyto-remédiation / extraction, remédiation par agents biologiques / microbiens ou par agents chimiques appliquées aux métaux lourds (Ayangbenro et Babalola, 2018), ou plus spécifiquement au cadmium (Genchi et al., 2020, Sterckeman et Puschenreiter, 2021, Haider et al., 2021, Hamid et al., 2020, Sripada et al., 2022). Synthèses comparant l'efficacité ou les coûts de diverses méthodes de détection ou de remédiation dans les sols ou les eaux (Khalid et al., 2017, Suciu et al., 2022, Singh et al., 2022, Irfan et al., 2021).	Exemple d'un travail académique sur la dépollution d'un sol de jardins potagers par remplacement de la terre à proximité de MetalEurope en France (contamination majeure au plomb avec Cd et Zn en co-contaminants) (Douay et al., 2008).

Vigilance active et gestion en cas de dépassement de seuils de vigilance de la teneur en cadmium dans des sols agricoles / terrains / jardins pollués	Autorités sanitaires, acteurs locaux, acteurs professionnels, particuliers	Exemple néo-zélandais de système gradué d'usage des sols agricoles (TFMS) selon lequel l'usage des sols recommandé est reparti en 4 catégories en fonction de sa concentration en Cd (Gray et Cavanagh, 2022).	Rapport du Haut Conseil de la Santé Publique (2022) incluant la définition de valeurs repères pour le cadmium dans les sols pollués (cas de personnes résidant sur des zones dont la pollution des sols par le cadmium est avérée ou possible), dont une section sur les « mesures de gestion du risque en cas de dépassement des valeurs repères » (cas de produits mis sur le marché ou destinés à l'autoconsommation <i>via</i> des jardins potagers). Guide de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR, 2011) sur la mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués : raisons, acteurs, données requises, outils et procédures. Rapport Sénatorial Lafon-Jourda (2020) sur « les problèmes sanitaires et écologiques liés aux pollutions des sols qui ont accueilli des activités industrielles ou minières, et sur les politiques publiques et industrielles de réhabilitation de ces sols » incluant des propositions relatives à l'information sur les sites et sols pollués (SSP), au droit de la protection des sols, à la surveillance des SSP, à la gestion des risques, et à la reconversion des SSP. Etudes locales de Santé Publique France sur les sols pollués (ex. Fort d'Aubervilliers, Gard, Aveyron, Nord-Pas-de-Calais) (SPF, 2019).

^a exemples de références à titre illustratif ; MAFOR : matières fertilisantes d'origine organique

6.3.2.3 Conclusion sur l'identification de mesures concernant les intrants et activités agricoles, les activités aquacoles, la pêche

Le GT rappelle que l'ingestion d'aliments représente une source majeure d'imprégnation humaine au cadmium pour la population générale française fumeuse et non-fumeuse, comparativement aux autres sources prises en compte dans le chapitre 5.

Compte-tenu des aliments contributeurs majeurs identifiés (pommes de terre, légumes, produits céréaliers transformés, produits de la mer), un lien entre la contamination en cadmium des denrées agricoles d'origine végétale et les intrants et pratiques agricoles, ainsi que la gestion des sols agricoles, est identifié.

Le GT constate, d'une part :

- Qu'il a déjà été observé une trajectoire d'amélioration de la qualité des boues de STEP et des restrictions d'usage (agriculture conventionnelle) ;
- De récents changements réglementaires santé-environnement sont intervenus (p.ex. REACH, ICPE (MTD), loi Labbé pour les Jardins, Espaces Végétalisés et Infrastructures (JEVI)) qui imposent des alternatives aux traitements chimiques et transforment les pratiques et normes ;
- Le besoin de renforcer de façon harmonisée les limites de concentrations en cadmium dans les intrants agricoles ou de flux de cadmium apporté aux sols agricoles, aussi bas que possibles ;
- Le besoin de renforcer et transmettre les connaissances sur les risques liés au cadmium pour les acteurs des filières agricoles ;
- Que la remédiation des sites et des sols pollués est souvent déjà encadrée par une réglementation spécifique ;

d'autre part :

- Que le chaulage et les techniques visant à limiter les transferts sol-plante du cadmium ainsi que la phytostabilisation, qui nécessitent des interventions maintenues dans la durée (coûts et augmentation des transferts en cas de rupture des traitements), ne doivent pas remplacer les réductions de cadmium à la source ;
- Que des solutions requièrent des efforts de recherche, au champ, à large échelle si possible pour couvrir différentes conditions de culture. Ces efforts pourraient aboutir à des solutions, mais il est peu vraisemblable que la pertinence de chacune soit assurée à l'échelle du territoire entier.

Compte-tenu de ces constats, le GT apportera un éclairage complémentaire, dans le chapitre 7, sur :

- **Les conditions d'amélioration à la source des MFSC** telles que :
 - L'application d'une limite pour les engrais minéraux phosphatés à 20 mg kg⁻¹ P₂O₅ et les modalités de réalisation concrète (origine géographique de la roche, recours à la décadmiation...) par les importateurs, fabricants, distributeurs.
 - Le recours éventuel à d'autres instruments :
 - L'étiquetage obligatoire des concentrations en cadmium des matières fertilisantes et les allégations / labels associés.
 - L'éventuelle taxation des matières fertilisantes en fonction des concentrations en cadmium.

- Les **conditions d'application de normes pour les pratiques agricoles** :
 - Le respect de l'application d'un flux d'apport annuel de cadmium dans les sols n'excédant pas $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'ensemble des matières fertilisantes et intrants agricoles (MAFOR et engrais minéraux phosphatés).
 - La caractérisation des concentrations en cadmium des sols avant toute autorisation d'épandage de MAFOR et engrais afin de limiter la contamination des sols.
 - Une restriction d'usage des sols agricoles en fonction de leurs concentrations en cadmium, comme une voie d'action possible à analyser pour réunir les éléments permettant de juger de son éventuelle pertinence.
- Les **conditions de co-construction d'outils** de formation, de communication et d'aide à la décision avec les acteurs de la filière des MFSC concernant les risques santé-environnement du cadmium, notamment pour :
 - La sensibilisation des acteurs (agriculteurs, conseillers agricoles, producteurs de MFSC, distributeurs...) au risque sanitaire lié au cadmium.
 - La promotion de la fertilisation au plus près des besoins en phosphore et les techniques agronomiques (assolements, temporalité...) permettant de minimiser l'utilisation de MFSC avec un intérêt double : limiter les apports de cadmium au sol et réduire les coûts pour l'exploitant.
- Les **conditions de contrôle et de surveillance** des produits et des pratiques afin d'explorer si :
 - Les moyens de contrôle et de surveillance des limites, flux etc. sont suffisants.
 - Les moyens de contrôle des TM en cadmium dans les produits destinés à l'alimentation animale (Directive n°2002/32/CE) sont appropriés par rapport à leur contribution à l'exposition, en considérant notamment que cette source participe au cycle environnemental du cadmium en raison de l'épandage des effluents d'élevage.

6.3.3 Mesures concernant les activités industrielles, liées aux services, aux transports, les produits manufacturés, les déchets et leur recyclage

Sur la base des résultats de l'étude de l'Ademe-Sogreah (2007, 2012) et de Belon et al. (2012), les retombées atmosphériques associées aux transports et aux activités industrielles contribuent à hauteur de 14% aux apports anthropiques en cadmium dans les sols agricoles en France. Par ailleurs, tel qu'indiqué dans le chapitre 4, en France, en 2022, selon des données de l'Agence européenne pour l'environnement, les premières sources industrielles de rejets de cadmium dans l'air et dans l'eau étaient respectivement l'industrie métallurgique et le secteur de l'énergie d'une part, et la gestion des déchets et des eaux usées d'autre part.

Par ailleurs, la modélisation présentée dans le chapitre 5 indique que l'exposition au cadmium par l'air et les poussières par les voies d'inhalation, d'ingestion et de contact cutané est une source mineure expliquant l'imprégnation humaine au cadmium (< 2%) pour la population générale fumeuse et non-fumeuse, hors milieu professionnel⁶⁶. Il est toutefois constaté que l'ingestion de poussières et de sols constitue d'autres sources importantes sur l'imprégnation humaine des enfants de moins de 12 mois. Une hypothèse avancée pour expliquer cette exposition précoce est le contact étroit avec les adultes ou les surfaces contaminées, qui pourrait contribuer indirectement à l'exposition des très jeunes enfants. De plus, il est supposé que les populations vivant près des routes à forte circulation, ainsi que les piétons, les cyclistes et les enfants, seraient plus exposés à l'inhalation de cadmium contenu dans les particules émises par le trafic. Cependant, telles qu'indiquées dans le chapitre 4, les études disponibles en France ne distinguent pas toujours les sources précises d'émissions de cadmium dans l'air liées aux transports, ce qui rend difficile l'évaluation de leur impact.

Dans cette section sont ainsi identifiées des options d'action relatives aux activités industrielles, aux services, aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et à leur recyclage, en distinguant d'une part les réglementations et les normes, et d'autre part les pratiques et techniques pouvant être utilisées pour respecter la réglementation et prévenir la contamination des milieux. Le GT a mis en perspective des mesures identifiées à l'échelle internationale et en France, puis a conclu sur des pistes d'analyses complémentaires.

6.3.3.1 Réglementation et normes

Un certain nombre d'options d'action relèvent de réglementations et de normes sur le cadmium visant les usages et rejets industriels, les produits manufacturés, le traitement et le recyclage des déchets, ainsi que la qualité de l'air ambiant et des eaux (cf. **Tableau 22**).

- *Usages et rejets industriels*

La réglementation européenne et le droit français imposent des **obligations liées à l'usage industriel du cadmium ou à son rejet dans l'environnement**. A l'échelle de l'UE, c'est le cas de la Directive cadre européenne sur l'eau (2000/60/CE), dite DCE, établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dans lequel les États membres veillent à la mise en place et/ou mise en œuvre des valeurs limites d'émission pertinentes, incluant le cadmium pour divers secteurs industriels (métaux, pigments, stabilisants, batteries...). Plus récemment, la directive relative aux émissions industrielles (2010/75/UE)

⁶⁶ Pour rappel, l'auto-saisine ne traite pas de l'exposition professionnelle au cadmium.

instaure une valeur limite moyenne d'émission pour les rejets d'eaux usées dans le secteur de la transformation des métaux non ferreux. La directive sur les émissions industrielles (IED) prévoit aussi la mise en œuvre des meilleures techniques disponibles (MTD) pour réduire les émissions et leurs impacts sur l'environnement. Différents secteurs industriels susceptibles de rejeter du cadmium dans l'environnement sont concernés par des documents de références sur les MTD appelés « BREF »⁶⁷ (document décrivant par secteur d'activité les MTD et les niveaux de performance associés à ces techniques). En France, outre la transposition de ces directives, l'arrêté du 2/2/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) comporte des valeurs limites de concentration ou de flux de cadmium pour différents types de rejets (eau, air). L'article R122-5 du code de l'Environnement prévoit aussi la réalisation d'études d'impact pour les installations classées soumises à autorisation. Ces études d'impact doivent notamment comprendre « *une description des incidences notables que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement résultant, entre autres, [...] des risques pour la santé humaine* ». Le Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter (DDAE) des ICPE relevant de la nomenclature IED doit ainsi comporter un volet comportant une Évaluation des Risques Sanitaires (ERS) basée sur le bilan des émissions de l'installation (un bilan réaliste et un bilan majorant, basé sur les valeurs limites à l'émission en vigueur ou envisagées, sont à la fois recommandés). Par ailleurs, entre autres polluants, les émissions de cadmium (seuils pour l'eau, l'air, les sols) doivent être reportées dans le Registre des rejets et des transferts de polluants (RRPT) et faire l'objet d'une déclaration annuelle (arrêté du 31/1/08). Des mesures de ce type ont été repérées ailleurs dans le monde (p. ex. aux Etats-Unis, en Australie) (cf. **Tableau 22**).

Il faut aussi noter qu'en France, le cadmium fait partie des substances dont les émissions sont visées par la **taxe générale sur les activités polluantes** (TGAP). Le montant de cette taxe, due par les ICPE sous certaines conditions, est fonction du poids de substances émises et son taux varie selon la nature des substances. Le cadmium a été ajouté à la liste des substances concernées depuis la loi de finances initiale de 2014, au même titre que d'autres éléments traces métalliques (Bottin et al., 2014).

Sans qu'il ne s'agisse ici d'évaluer ces dispositions, le GT rappelle qu'en 2022, selon la base de données du Registre européen des rejets et des transferts de polluants⁶⁸ (PRTR européen) de l'Agence européenne pour l'environnement, le total des émissions françaises de cadmium par des installations industrielles dans l'air et dans l'eau ont baissé respectivement de 48 % et 69 % par rapport aux émissions de l'année 2012 (cf. section 4.2.2).

- Produits manufacturés

A l'échelle de l'UE, le règlement REACH (*Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals*) entré en vigueur en juin 2007, **soumet un certain nombre de produits à autorisation ou restrictions**. Tel est le cas pour le cadmium. En effet, selon ce règlement, le cadmium est associé à 9 numéros de substances chimiques répertoriées comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC)⁶⁹. Il en découle des restrictions d'usage ou des limites

⁶⁷ *Best Available Techniques Reference Documents* (BREF)

⁶⁸ [European Industrial Emissions Portal](#)

⁶⁹ Selon classification *Chemical Abstract Service* (CAS) : cadmium, cadmium carbonate, cadmium chloride, cadmium fluoride, cadmium hydroxide, cadmium nitrate, cadmium oxide, cadmium sulphate, cadmium sulphide.

en cadmium dans les plastiques, les peintures, le cadmiage d'articles métalliques, les charges de brasage ou encore les bijoux. Toujours dans l'UE, le secteur des batteries, piles et accumulateurs a fait l'objet d'une interdiction des produits contenant du cadmium au-delà d'un certain seuil, touchant un nombre croissant de produits au fil des directives. Les piles portables destinées à être utilisées dans les outils électriques sans fil faisaient l'objet d'une dérogation qui a pris fin au 31/12/16 (à l'exception des systèmes d'urgence et d'alarme ou dans les équipements médicaux). D'autres dispositions visent le cadmium dans les équipements électriques et électroniques (Directive 2011/65/UE) ainsi que dans les emballages et déchets d'emballage (Règlement (UE) n° 2025/40). Le cadmium et ses composés font également partie des substances interdites dans les produits cosmétiques (Règlement (CE) n° 1223/2009).

Il convient de noter que les règlements européens s'appliquent sans transposition dans les États Membres. Le règlement REACH implique par ailleurs une **obligation pour les fabricants et importateurs de fournir des informations suffisantes** pour permettre une utilisation sûre de l'article contenant du cadmium à plus de 0,1 % en poids. De plus, selon ce même règlement, le cadmium et ses composés sont soumis à la procédure de notification des exportations auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA). La directive 2011/65/CEE évoquée ci-dessus a fait l'objet d'une transposition dans le droit français.

L'existence de **limites réglementaires dans certains produits** de consommation courante (cosmétiques, jouets, emballages, parfums, bijoux, textiles) a également été repérée dans d'autres pays.

Globalement, Bottin et al. (2014) remarquent que les usages du cadmium ont été restreints depuis une vingtaine d'années, par exemple du fait de son interdiction dans les plastiques alimentaires, les équipements électriques et électroniques, et de son remplacement dans les piles.

- *Traitement et recyclage des déchets*

Le secteur des déchets fait également l'objet d'**obligations en matière de traitement ou de recyclage des déchets contenant du cadmium et d'autres métaux**. Dans l'UE, la réglementation sur l'incinération des déchets (Directive 2000/76/CE) inclut notamment une valeur limite d'émission de cadmium pour les rejets des eaux usées résultant de l'épuration des gaz de combustion ainsi qu'une valeur limite d'émission atmosphérique de cadmium. Il existe aussi d'autres dispositions spécifiques concernant le cadmium dans les matériaux et les composants des véhicules hors d'usage (Directive déléguée (UE) 2023/544). Plusieurs arrêtés transposent ces mesures dans le droit français.

Par ailleurs, il existe des **accords internationaux sur la circulation des déchets dangereux** qui prennent en compte la contamination en cadmium. Par exemple, la Convention internationale de Bâle (1989) sur le contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et leur élimination classent certains déchets contenant du cadmium : assemblages électriques et électroniques, câbles métalliques, batteries usagées). Les signataires, dont la France, s'engagent à de bonnes pratiques de gestion de ces produits (basel.int, 2025).

En France, tel qu'indiqué dans le chapitre 4, selon les données du CITEPA⁷⁰, le traitement des déchets contribuait en 2021 pour 6% à l'émission de cadmium. Cette contribution a diminué entre 1990 et 2000 et est stable depuis 2000.

- *Qualité de l'air ambiant et des eaux*

Enfin, des **réglementations et normes portent sur la présence de cadmium dans l'environnement**. Par exemple, la directive européenne 2004/107/CE fixe une valeur cible pour la concentration de cadmium dans l'air ambiant afin d'éviter, de prévenir ou de réduire ses effets nocifs sur la santé des personnes et sur l'environnement (5 ng m³). En conséquence, les États membres doivent lister les territoires où les niveaux de cadmium sont inférieurs ou supérieurs à cette valeur cible et prendre des mesures visant les sources d'émissions prédominantes. Cette directive prévoit également la bonne information du public et des acteurs concernés par cet enjeu. Ce texte est transposé dans le droit français. Le Code de l'environnement prévoit la surveillance de la qualité de l'air ambiant et de la qualité des eaux de surface et souterraines, notamment en ce qui concerne les concentrations en cadmium. Pour les eaux de surface, il existe des Normes de Qualité Environnementale (NQE), variant pour le cadmium en fonction de la dureté de l'eau (Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010).

Il existe également des **accords internationaux** en la matière, approuvés par la France. En particulier, le Protocole international d'Aarhus sur les métaux lourds (cadmium, plomb et mercure) de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (UNTC, 1983) implique une réduction des émissions totales de cadmium dans l'atmosphère, l'usage des meilleures techniques disponibles pour réduire les sources d'émissions stationnaires, et l'application de valeurs limites pour contrôler les émissions. De plus, la Convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est liste le cadmium parmi les substances dangereuses faisant l'objet de travaux et de recommandations techniques sectorielles pour prévenir la pollution marine (OSPAR Commission, 2023). Entre 1990 et 2019, selon une analyse de données, les parties contractantes (dont la France) sont dans l'ensemble parvenues à réduire les émissions et les pertes de mercure (-40%), de cadmium (-45%) et de plomb (-66%) dans l'espace maritime concernant l'accord (Axe et al., 2022).

En France, tel qu'indiqué dans le chapitre 4, d'après le CITEPA, les émissions atmosphériques de cadmium ont été divisées par 10 entre 1990 et 2022. Selon les pouvoirs publics (Commissariat général au développement durable, 2019), la concentration en cadmium dans l'air en 2016 était conforme aux normes de qualité dans l'ensemble des points de mesure atmosphérique. Des concentrations excessives étaient néanmoins identifiées dans deux masses d'eau de surface (lagune de Bages dans l'Aude et canal de la Deule dans le Pas-de-Calais) et des concentrations élevées étaient observées dans une masse d'eau souterraine en Moselle. De fortes contaminations en cadmium sont toutefois relevées dans des zones anciennement exposées à des rejets industriels (estuaire de la Gironde, pertuis charentais). Des sites et sols pollués restent concernés par une dispersion de cadmium (persistant dans l'environnement) du fait d'activités industrielles actuelles ou passées : sites dans les vallées

⁷⁰ Association à but non-lucratif produisant des connaissances sur les polluants atmosphériques et gaz à effet de serre, en soutien aux décisions des acteurs concernés (www.citepa.org/qui-sommes-nous/)

de la Somme et de la Seine aval, en Lorraine et en Alsace, dans le cours du Rhône et son delta, sites miniers du Gard (Commissariat général au développement durable, 2019). Bien que les sites et sols pollués représentent des conditions de points chauds localisés de contamination au cadmium, le périmètre de l'autosaisine vise à aborder l'exposition de la population générale au cadmium dans le contexte d'une pollution généralisée et diffuse.

L'étude des options d'action spécifiquement dédiées aux émissions industrielles générant une problématique de sites et sols pollués n'est pas approfondie dans le cadre de cette auto-saisine, ces dernières faisant ou devant faire l'objet, selon les situations, de mesures spécifiques ciblées. Néanmoins, le GT relève l'existence d'une diversité de cadres ou démarches d'accompagnement à la maîtrise du risque de pollution des milieux et aux restrictions qui y sont associées (cf. annexe 6).

Tableau 22. Repérage de réglementations ou normes visant le cadmium en lien avec des activités industrielles, services, transports, produits de consommation, déchets et leur recyclage

REGLEMENTATION OU NORMES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Usages et rejets industriels			
Obligations liées à l'usage industriel de cadmium ou son rejet dans l'environnement	Exploitations minières, fabrications et transformations industrielles	Réglementation européenne (Directive 2000/60/CE) établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau incluant des valeurs limites d'émission en Cd selon la directive relative aux objectifs de qualité pour les rejets de cadmium (83/513/CEE) pour divers secteurs industriels : extraction de métaux, fabrication de composés de cadmium, fabrication de pigments, fabrication de stabilisants, fabrication de batteries, électrodéposition. Réglementation européenne (Directive 2010/75/UE) relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution), visant notamment la transformation des métaux non ferreux (production de métaux bruts, fusion y compris alliages avec une capacité de fusion supérieure à 4 t j⁻¹ pour le Cd, avec une valeur limite moyenne d'émission pour les rejets d'eaux usées résultant de l'épuration des gaz résiduels de 0,05 mg Cd (et ses composés) / L. Réglementation identifiée dans d'autres pays P.ex. aux Etats-Unis (ATSDR, 2012) : - Cd parmi les 189 produits chimiques répertoriés comme polluants atmosphériques dangereux (Clean Air Act) - Cd parmi les produits chimiques figurant dans l'Emergency Planning and Community Right-To-Know Act de 1986, selon lequel les propriétaires et exploitants d'installations fabriquant, important, traitant ou utilisant l'un de ces produits doivent déclarer chaque année les rejets dans tous les milieux environnementaux.	Arrêté du 2/2/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation, incluant : <u>Rejet de Cd, mercure, thallium, et leurs composés dans l'air</u> : - Si flux horaire total de cadmium, mercure et thallium, et de leurs composés dépasse 1 g h⁻¹, la valeur limite de concentration est de 0,05 mg m³ par métal et de 0,1 mg m³ pour la somme des métaux (exprimés en Cd + Hg + Tl) - Si flux horaire de Cd et mercure, et leurs composés particuliers et gazeux, dépasse 10 g h⁻¹, mesure journalière des émissions à réaliser sur un prélèvement représentatif effectué en continu. <u>Rejet de Cd et ses composés au milieu naturel par les eaux résiduaires</u> : valeur limite de concentration de 25 µg L⁻¹ <u>Rejet de Cd dans les effluents liés à la production de dioxyde de titane</u> : valeur limites de flux spécifique de 0,001 kilogramme Cd / tonne de dioxyde de titane produite <u>Rejet d'arsenic, de cadmium et mercure et leurs composés dans un cours d'eau</u> : si > 0,1 kg j⁻¹ d'arsenic, de cadmium et mercure, et leurs composés (exprimés en As + Cd + Hg), diverses obligations de prélèvements en aval sont imposées avec des actions correctives le cas échéant ; mesures à communiquer à l'inspection des installations classées. <u>Valeur limite de concentration en Cd selon les activités de production et/ou transformation de métal</u> : 50 µg L⁻¹ pour la

		- Cd considéré comme substances dangereuse en vertu du Clean Water Act, selon lequel tout rejet de ces produits chimiques au-delà d'un certain seuil dans les eaux navigables est soumis à des exigences de déclaration. P.ex. en Australie (UNEP, 2020) : - Cd devant être déclaré dans le cadre de l'inventaire national des polluants (NPI) : émissions de Cd et de composés de Cd déclarées chaque année par les installations qui utilisent ou émettent plus de 10 tonnes de cadmium ou de composés de cadmium, brûlent plus de 2 000 tonnes de combustible, consomment plus de 60 000 mégawattheures d'électricité (à l'exclusion de l'éclairage et des usages moteurs) ou ont une puissance électrique de 20 mégawatts au cours d'une année.	production/transformation de plomb, de zinc ou de ferroalliages, 25 µg L⁻¹ sinon. Transposition partielle de la Directive 2000/60/CE par des arrêtés relatifs aux méthodes et aux critères à mettre en œuvre pour délimiter et classer les masses d'eau, au programme de surveillance de l'état des eaux, aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface. Arrêté du 31 janvier 2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions et de transferts de polluants et des déchets incluant des seuils de rejet (chronique ou accidentel, canalisé ou diffus) de Cd et ses composés dans l'air (10kg an⁻¹), l'eau (1kg an⁻¹ et 2g j⁻¹), les sols (5kg an⁻¹). Transposition complète de la Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles par divers textes.
Taxes sur les activités polluantes	Acteurs industriels	<i>Pas de mesure spécifique identifiée.</i>	Taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) pour les ICPE, incluant le cadmium dans son assiette (seuil d'assujettissement de 10 kg an ⁻¹ , taux de 589,21 € par kg) (Bottin et al., 2014 ; Direction de l'information légale et administrative, 2025).
Produits manufacturés			
Autorisation et restrictions en lien avec le cadmium dans les produits	Fabricants, transformateurs, importateurs	Réglementation européenne REACH (entrée en vigueur en 2007) associant le Cd à 9 numéros CAS répertoriés comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) en raison de leur toxicité pour la reproduction, leur mutagénicité, leur toxicité pour certains organes cibles après une exposition répétée et/ou leur cancérogénicité, en fonction du produit chimique (UNEP, 2020) : - Plastiques : Cd ne devant pas être utilisé dans les mélanges ou articles fabriqués à partir de certains polymères, ou si mis sur le marché, concentration en Cd ne devant pas dépasser 0,01% du poids. - Peintures : Limite en Cd (0,01% du poids) imposée dans certains produits (avec des exceptions).	La réglementation européenne REACH s'applique sans transposition dans les Etats membres de l'UE (reach-info.ineris.fr) : - Responsabilité de l'évaluation et de la gestion des risques des substances, confiée aux entreprises. - Suivi de la mise en œuvre effectué en Europe par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA). - En France, Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) en charge de l'application de cette réglementation. Transposition complète de la Directive 2013/56/UE dont les dispositions interdisant la mise sur le marché ou imposant une TM en Cd pour certaines batteries / piles / accumulateurs :

		- Cadmiage d'articles métalliques : ne pas utiliser le Cd pour le cadmiage d'articles métalliques ou de composants d'articles utilisés dans les équipements pour la production alimentaire, l'agriculture, la réfrigération et la congélation, l'impression et la reliure, ainsi que dans les équipements et machines pour la production d'articles ménagers, meubles, articles sanitaires et installations de chauffage central et de conditionnement d'air. - Charges de brasage : Cd à ne pas utiliser ou mettre sur le marché dans les charges de brasage en concentration $\geq 0,01$ % en poids à l'exception de celles utilisées dans les applications de défense et aérospatiales et pour des raisons de sécurité. - Bijoux : perles métalliques et autres composants métalliques pour la fabrication de bijoux ne pouvant être utilisés ou mis sur le marché si la concentration en Cd est $\geq 0,01$ % en poids. Réglementation européenne interdisant la mise sur le marché de certaines batteries / piles / accumulateurs contenant du Cd au-delà d'un certain seuil (0,002 % en poids) et encourageant la collecte et le recyclage des produits qui en sont issus (Directive 91/157/CEE, Directive 2006/66/CE, Directive 2013/56/UE). Réglementation européenne (Directive 2011/65/UE) imposant des restrictions sur les substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS) dont des concentrations maximales en Cd dans certaines substances. Réglementation européenne (Règlement (UE) n° 2025/40) relative aux emballages et aux déchets d'emballages, exigeant des États membres (outre la réglementation qui s'applique aux MCDA) de s'assurer que la somme des niveaux de concentration en plomb, Cd, mercure et chrome hexavalent présents dans l'emballage ne dépasse pas 100 mg kg⁻¹. Réglementation européenne (Règlement (CE) n° 1223/2009) relatives aux produits cosmétiques listant le cadmium et ses composés parmi les substances interdites dans ces produits. Dans plusieurs autres pays, réglementation sur la limite en Cd dans certains produits de consommation courante (cosmétiques, jouets, emballages, parfums, bijoux, textiles),	- Décret n° 2015-849 du 10 juillet 2015 relatif à la mise sur le marché de piles et accumulateurs et à la collecte et au traitement de leurs déchets. - Arrêté du 6 août 2015 portant abrogation de l'arrêté du 18 novembre 2009 modifié fixant les cas et conditions dans lesquels les obligations relatives au taux de cadmium dans les piles et accumulateurs portables ne s'appliquent pas. - Arrêté du 6 août 2015 modifiant l'arrêté du 18 novembre 2009 relatif à la procédure d'enregistrement et de déclaration au registre national pour les piles et accumulateurs. Transposition complète de la Directive 2011/65/UE par le décret n° 2013-988 du 6 novembre 2013 relatif à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Code de la santé publique, chapitre dédié aux produits cosmétiques (Article L5131-2) indiquant que les produits cosmétiques importés ou mis à disposition sur le marché satisfont aux dispositions du règlement (CE) n° 1223/2009 (voir ci-contre). Code de l'environnement, section dédiée aux emballages (Article R543-45) indiquant que la somme des niveaux de concentration en plomb, cadmium, mercure et chrome hexavalent présents dans l'emballage ou dans ses éléments ne doit pas dépasser 100 ppm en masse.

		p.ex. Etats-Unis, Canada, Chine, Union économique eurasiennne, Chine, Taiwan (UNEP, 2010, 2020).	
Obligations de déclaration et d'information	Fabricants, transformateurs, importateurs	Réglementation européenne REACH associant le Cd à 9 numéros CAS répertoriés comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) (UNEP, 2020) - Obligation pour les fabricants et importateurs de fournir des informations suffisantes pour permettre une utilisation sûre de l'article contenant du Cd à plus de 0,1 % en poids. - Cd et composés du Cd soumis à la procédure de notification des exportations (ECHA).	La réglementation européenne REACH s'applique sans transposition dans les Etats membres de l'UE (reach-info.ineris.fr)
Traitement et recyclage des déchets			
Obligations liées au traitement ou recyclage des déchets contenant du cadmium	Acteurs publics et privés concernés par le traitement et le recyclage des déchets	Réglementation européenne sur l'incinération des déchets (Directive 2000/76/CE), prenant appui sur le 5^{ème} programme communautaire de politique et d'action en matière d'environnement et de développement durable visant notamment une réduction de 70 % au moins des émissions de Cd dans l'air, et établissant : - Valeur limite d'émission Cd et ses composés : 0,05 mg L⁻¹ pour les rejets des eaux usées résultant de l'épuration des gaz de combustion - Valeur limite d'émission atmosphérique de Cd et ses composés de 0,05 mg m³ (voir aussi Directive 2010/75/UE) Réglementation européenne (Directive 2010/75/UE) relative aux émissions industrielles rappelant la valeur limite moyenne d'émission de Cd (et ses composés) dans l'air pour les installations d'incinération des déchets de 0,05 mg Nm³. Règlementation européenne (Directive déléguée (UE) 2023/544) relative aux véhicules hors d'usage demandant que les matériaux et les composants des véhicules mis sur le marché après le 1^{er} juillet 2003 ne contiennent pas de plomb, de mercure, de cadmium ou de chrome hexavalent (sauf valeur maximale de 0,01 % en poids de cadmium tolérée dans les batteries pour véhicules électriques).	Arrêté du 20/09/02 (modifié par l'arrêté du 10/2/05) relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux, incluant : - Valeur limite d'émission Cd et ses composés dans les eaux résiduaires rejetées au milieu naturel : 0,05 mg L⁻¹ - Valeur limites de rejet atmosphérique de Cd et ses composés (+ thallium et ses composés) : 0,05 mg m³ Arrêté du 03/08/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE fixant une valeur limite en Cd et ses composés avant rejet dans un réseau d'assainissement collectif urbain, ou avant rejet au milieu naturel, de 0,05 mg L⁻¹. Arrêté du 28 février 2013 portant transposition des chapitres V et VI de la directive 2010/75/UE incluant le respect des valeurs limites d'émission, voir ci-contre). Arrêté du 22/11/23 transposant la directive déléguée (UE) 2023/544 relative aux véhicules hors d'usage demandant l'absence de cadmium dans ces véhicules sauf exception dans les batteries pour véhicules électriques (voir ci-contre).

		Exemples de réglementation dans d'autres pays, p.ex. : - Taux de recyclage obligatoire du Cd dans certains produits comme les batteries Ni-Cd en République de Corée (UNEP, 2020) - Surveillance des eaux souterraines requise dans les décharges de déchets solides municipaux aux Etats-Unis selon le Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) (ATSDR, 2012)	
Accords internationaux sur la circulation des déchets dangereux	Etats, acteurs publics et privés concernés par le traitement et le recyclage des déchets	Convention internationale de Bâle (1989) sur le contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et leur élimination (UNEP, 2020) : - Classification de certains produits / déchets contenant du Cd comme produits dangereux (déchets d'assemblages électriques et électroniques, câbles métalliques, batteries usagées) - Engagements des signataires à de bonnes pratiques de gestion, assortis d'un suivi à faire auprès du Secrétariat. Résolution 2/7-2016 de l'Assemblée des Nations Unies sur l'Environnement incluant des engagements de coopération pris par les signataires (gouvernements, acteurs privés / industries, ONGs)	Convention internationale de Bâle signée par la France le 22/03/89 et approuvée le 7/1/91.
Qualité de l'air, des eaux, des sols			
Valeurs cibles de la concentration de cadmium dans l'air ambiant / les eaux / les sols, et leur surveillance	Pouvoirs publics	Réglementation européenne (Directive 2004/107/CE) concernant l'arsenic, le cadmium , le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant , incluant une diversité de mesures dont : - Valeur cible pour la concentration de Cd dans l'air ambiant afin d'éviter, prévenir ou réduire ses effets nocifs sur la santé des personnes et sur l'environnement (5 ng m³). - Liste (par les Etats Membres) des zones et agglomérations où les niveaux de cadmium sont inférieurs ou supérieurs à la valeur cible, et prise de mesures visant les sources d'émissions prédominantes.	Transposition complète de la Directive 2004/107/CE par les textes suivants : Loi n° 2008-757 du 1er août 2008 relative à la responsabilité environnementale et à diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire dans le domaine de l'environnement ; décret n° 2008-1152 du 7 novembre 2008 relatif à la qualité de l'air. Décret n°2010-1250 visant à améliorer la qualité de l'air en France en réduisant les émissions de polluants et en protégeant la santé humaine, incluant une valeur cible de 5 ng m ³ , moyenne, calculée sur une année civile, du contenu total de la fraction PM10.

	- Méthodes et critères communs pour l'évaluation des concentrations, et transmission des rapports à la CE. - Mise à disposition d'informations adéquates pour le public et les parties prenantes sur la concentration en polluants (dont le Cd) dans l'air ambiant. Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, incluant des normes de qualité environnementale (NQE) pour les substances prioritaires et certains autres polluants, dont le cadmium et ses composés : - Eaux de surface intérieures (rivières, lacs, masses d'eau artificielles) : - o NQE en valeur moyenne annuelle $\leq$ à : 0,08 à 0,25 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) - o NQE en concentration maximale admissible $\leq$ à : 0,45 à 1,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) - Eaux côtières et de transition : - o NQE en valeur moyenne annuelle $\leq$ à 0,2 $\mu\text{g L}^{-1}$ - o NQE en concentration maximale admissible $\leq$ à : 0,45 à 1,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) Valeur guide de l'OMS sur la teneur en Cd dans l'air (5 ng m³) fixée afin de prévenir l'une augmentation des flux dans les sols agricoles, susceptible d'accroître l'apport alimentaire (WHO Europe, 2000, p.138) Valeurs limites de contamination en Cd dans l'environnement, p.ex. pour l'eau de mer (OMS, United States Environmental Protection Agency, Turkish Standards Institute) (UNEP, 2010, p.132).	Code de l'environnement prévoyant la surveillance de la qualité de l'air ambiant (articles R221-1 à D221-38) et de la qualité des eaux de surface et sous-terraines (programme de surveillance de l'état des eaux, arrêté du 26/04/22 en application de l'article R. 212-22 du code), notamment en ce qui concerne le cadmium. Arrêté du 26 avril 2022 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement, incluant pour le cadmium et ses composés. Arrêté du 27 juillet 2018 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement, incluant des normes de qualité environnementales (NQE) en lien avec le cadmium et ses composés pour : - Eaux de surface intérieures (rivières, lacs, masses d'eau artificielles) : - o NQE en valeur moyenne annuelle $\leq$ à : 0,08 à 0,25 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) - o NQE en concentration maximale admissible $\leq$ à : 0,45 à 1,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) - Eaux côtières et de transition : - o NQE en valeur moyenne annuelle $\leq$ à 0,2 $\mu\text{g L}^{-1}$ - o NQE en concentration maximale admissible $\leq$ à : 0,45 à 1,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (selon les classes de dureté de l'eau) - Mollusques bivalves des eaux côtières et de transition : 5,26 à 6,10 mg kg⁻¹ de poids sec (selon mollusque utilisé) Arrêté du 2 juillet 2012 portant modification de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines, fixant une valeur seuil pour le cadmium de 5 $\mu\text{g L}^{-1}$.

			Valeurs repères pour le Cd dans les sols pollués et indications de mesures de gestion du risque en cas de dépassement (HCSP, 2022).
Accords internationaux	Etats	Protocole international d'Aarhus sur les métaux lourds (cadmium, plomb, mercure) de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (UNTC, 1983, ratifiée par l'UE), impliquant une réduction des émissions totales de Cd dans l'atmosphère, l'usage des meilleures techniques disponibles pour réduire les sources d'émissions stationnaires, l'application de valeurs limites pour contrôler les émissions. Convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est (OSPAR), mettant en place un mécanisme de coopération entre Etats pour protéger cet environnement ; Cd listé parmi les substances dangereuses faisant l'objet de travaux et recommandations techniques sectorielles pour prévenir la pollution en éliminant des émissions, rejets et pertes (OSPAR Commission, 2023). Convention sur la protection du milieu marin de la zone maritime baltique (Convention d'Helsinki, 1992) dont les objectifs sont de prendre des mesures pour prévenir la pollution et restaurer les milieux concernés, en réduisant les émissions et rejets de substances dangereuses (plusieurs recommandations sectorielles visant le Cd) (UNEP, 2010).	Protocole international d'Aarhus signé par la France le 24/06/98 et approuvé le 26/7/02. Convention pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est (OSPAR) : la France fait partie des parties contractantes.

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement ; REACH : enRegistrement, Evaluation et Autorisation des produits Chimiques.

6.3.3.2 Pratiques et techniques

Les pratiques et techniques identifiées par le GT concernent notamment les possibilités de substitutions, de réduction des émissions ou de remédiation du cadmium dans l'industrie, des démarches volontaires de certification et d'information des utilisateurs, ainsi que des mesures de surveillance et de gestion de la pollution des milieux (**Tableau 23**).

- *Techniques industrielles*

La réduction des émissions de cadmium provenant de l'exploitation minière, de la métallurgie, de l'incinération des déchets, le développement de techniques d'élimination sûre des déchets et des effluents contenant du cadmium, ainsi que la promotion de mesures sûres et efficaces pour accroître le recyclage du cadmium font partie des recommandations de l'OMS pour réduire l'exposition de la population au cadmium (WHO, 2019).

En ce sens, **diverses mesures permettant de remplacer le cadmium ou d'en réduire les émissions** dans les activités industrielles sont identifiées dans la littérature (UNEP, 2010). Des alternatives au cadmium existent dans diverses filières (batteries, alliages de métaux, stabilisants dans les plastiques, les pigments). Des techniques de réduction des émissions peuvent également s'appliquer à la gestion ou au recyclage des déchets (ex. décharges soumises à autorisation, utilisation d'équipements de stockage, d'incinération ou d'enfouissement adaptés, programmes de recyclage des batteries). L'UNEP (2010) remarque qu'à long terme, pour éviter que le cadmium ne se retrouve dans le flux général des déchets, la minimisation de l'utilisation intentionnelle du cadmium a été le principal moteur de la politique de substitution du cadmium dans les pays où une telle politique a été mise en place.

A défaut, diverses **techniques de traitement ou de remédiation** appliquées aux eaux usées industrielles ou aux milieux pollués sont identifiées par l'UNEP (2010). C'est un domaine faisant l'objet de développements technologiques (précipitation chimique, adsorption, échanges d'ions, technologies de filtration par membrane, méthodes électrochimiques, nanotechnologies, charbon actif, agents microbiens...), comme en attestent plusieurs revues de la littérature scientifique sur le sujet (p.ex. Das et al., 2016, Ayangbenro et Babalola, 2018, Irfan et al., 2021, Anetor et al., 2022, Singh et al., 2022). Selon les auteurs, l'applicabilité à grande échelle de ces technologies reste souvent à confirmer.

En France, ces enjeux ont été documentés par l'INERIS (Brignon et al., 2017) et le BRGM (2019). Entre autres considérations, l'INERIS signale un point de vigilance sur le développement du secteur photo-électrique, auquel pourrait être associé une augmentation des émissions de cadmium.

- *Certifications des produits manufacturés et information des utilisateurs*

La promotion de l'élimination de l'utilisation du cadmium dans des produits tels que les jouets, les bijoux et les plastiques, ainsi que la sensibilisation de la population à l'importance de minimiser les rejets de déchets contenant du cadmium font également partie des recommandations de l'OMS pour réduire l'exposition au cadmium (WHO, 2019). Dans le secteur agroindustriel, l'usage de roches phosphatées à moindre concentration en cadmium pour la production d'engrais minéraux est également une option identifiée (cf. 6.3.2.2).

Des **dispositifs de certification volontaire des produits manufacturés** existent pour inciter les fabricants à faire valoir leurs engagements (UNEP, 2020). Par exemple, le label Bluesign® a été développé dans le secteur des textiles, afin de valoriser des produits respectant des exigences sanitaires et environnementales, notamment en matière de consommation de produits chimiques, d'impact carbone, de consommation d'eau et d'énergie. Le cadmium fait partie des substances interdites au-delà d'un seuil de concentration variable selon les matériaux (Bluesign, 2023).

Du côté des utilisateurs, l'UNEP (2020) identifie la **sensibilisation du public à l'élimination correcte des produits contenant du cadmium** comme une option d'action, conditionnée par le développement de points de collecte adaptés.

Dans un cas comme dans l'autre, il apparaît au GT que ce type d'options d'action doit pouvoir s'appuyer sur une **médiation scientifique** large afin que les acteurs concernés soit clairement informés et, concernant le secteur privé, que des engagements soient pris dans le cadre d'une démarche de responsabilité sociale des entreprises (RSE).

- *Surveillance et gestion de la pollution des milieux*

Au-delà du secteur industriel, diverses pratiques et techniques portent plus largement sur la surveillance et la gestion de la pollution des milieux.

De fait, la pollution au cadmium dans l'environnement fluctue en fonction des territoires, du milieu naturel, des activités anthropiques, de son transport via l'air, l'eau, les précipitations, le déplacement des animaux migrateurs etc. (UNEP, 2010). Différentes **sources de données ou dispositifs de surveillance du cadmium** à l'échelle internationale et en France ont été reportés dans le **Tableau 23** (voir également chapitre 4). Sans qu'il ne s'agisse ici de faire un état des lieux exhaustif de ces sources de données et dispositifs, le GT formule plusieurs observations.

D'une part, concernant la pollution atmosphérique par les ICPE, le GT indique que la nomenclature a évolué. Des recherches complémentaires (ex. arrêtés préfectoraux, liste des entreprises qui utilisent du cadmium) pourraient être faites sur les sources d'émission. De plus, les données d'émissions atmosphériques ici considérées sont spécifiques à l'industrie ; d'autres sources (ex. ménages) pourraient être prises en compte. Par ailleurs, pour cibler les actions mises en place, il apparaîtrait utile d'identifier les sous-catégories d'activités industrielles les plus contributrices et de distinguer « quantité de rejets » et « dangerosité », pour identifier les aspects les plus préoccupants.

D'autre part, en lien avec les sources et voies d'exposition liées aux transports exposées dans le chapitre 4, il convient d'améliorer la compréhension et la gestion des émissions de cadmium liées aux transports, et pour cela :

- d'accroître les études sur les particules fines (PM1 et PM2.5) : ces études devraient se concentrer sur la caractérisation des sources d'émission de cadmium, leur répartition géographique, et les paramètres liés au transport du cadmium par ces particules, notamment les flux vers les individus et les parcelles agricoles.
- d'analyser les effets des matériaux recyclés dans la chaussée : Évaluer le rôle du bitume recyclé et des pratiques d'entretien routier dans la remobilisation du cadmium.

- D'étudier l'exposition différenciée des populations vulnérables : mieux comprendre comment les enfants, les cyclistes, et les populations résidant près des routes sont affectés par l'exposition au Cd.

L'exploration de ces dimensions permettra d'élaborer des stratégies plus efficaces pour réduire les émissions de cadmium et protéger la santé publique, en particulier dans les zones urbaines et agricoles sensibles.

Enfin, outre la surveillance, il existe en France une diversité de **cadres ou démarches d'accompagnement à la maîtrise du risque de pollution des milieux** et sur les **restrictions** qui y sont associées (DGPR, 2011, 2017 et cf. annexe 6).

Tableau 23. Repérage des pratiques et techniques visant le cadmium en lien avec des activités industrielles, services, transports, produits de consommation, déchets et leur recyclage

PRATIQUES ET TECHNIQUES			
Mesures	Acteurs ciblés	UE et International	France
Techniques industrielles			
Substitution du cadmium et réduction des émissions industrielles	Acteurs industriels (ICPE)	Diverses mesures identifiées dans une synthèse de connaissances internationale de l'UNEP (2010) sur le Cd : - Réduction de la consommation de matières premières et de produits contenant du cadmium en tant qu'impureté ou utilisation de matières premières à faible concentration en cadmium (ex. des engrais phosphatés, voir section 5.3.2) - Substitution (ou élimination) des produits, processus et pratiques contenant ou utilisant du Cd, par des alternatives (ex. appliquées à la métallurgie, aux batteries, pigments, etc.) - Gestion des déchets contenant du Cd (ex. décharges soumises à autorisation et équipements de stockage / d'incinération / d'enfouissement adaptés). - Recyclage des déchets contenant du Cd (ex. programmes de recyclage des batteries).	Alternatives aux usages du Cd dans l'industrie et ses alternatives : substituabilité des usages et de la consommation de Cd (batteries, pigments, brasage des métaux), recyclage (batteries), perspectives de réduction des émissions évoquées dans des synthèses de connaissances (Brignon et al., 2017 ; BRGM, 2019).
Remédiation du cadmium dans les processus industriels	Acteurs industriels (ICPE), prestataires spécialisés	Diverses techniques de contrôle des rejets de Cd <i>via</i> des technologies de processus à faible émission et d'épuration des effluents gazeux et des eaux usées (p.ex. précipitation, filtration) (UNEP, 2010). Diverses techniques de remédiation, notamment dans les eaux usées industrielles / milieux pollués étudiées dans la littérature scientifique : précipitation chimique, adsorption, échanges d'ions, technologies de filtration par membrane, méthodes électrochimiques, nanotechnologies, charbon actif, agents microbiens... (Das et al., 2016 ; Ayangbenro et Babalola, 2018 ; Irfan et al., 2021 ; Anetor et al., 2022 ; Singh et al., 2022).	Techniques de traitement dans les effluents industriels , les stations d'épuration , les eaux de surface évoquées dans une synthèse de connaissances (Brignon et al., 2017).

Certifications des produits manufacturés et information des utilisateurs			
Standards et dispositifs de certification volontaire des produits manufacturés	Acteurs industriels (ICPE), certificateurs	Standards / certifications basés sur la présence ou TM en substances dangereuses (dont le Cd), p.ex. : Bluesign ® (textiles), Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC), Nordic Swan Ecolabel (UNEP, 2020). Exemple d'engagement volontaire : diminution de la teneur en Cd de certains composants de batteries chez Apple (<i>Regulated Substances Specification</i>) (UNEP, 2020).	<i>Pas de mesure spécifique au Cd identifiée.</i>
Information des utilisateurs de produits manufacturés contenant du cadmium	Pouvoirs publics, centres de tri, utilisateurs	Sensibilisation du public à l'élimination correcte des produits contenant du Cd (ex. piles de Ni/Cd) avec le développement de points de collecte adaptés (UNEP, 2010).	<i>Pas de mesure spécifique au Cd identifiée.</i>
Surveillance et gestion de la pollution des milieux			
Dispositifs de surveillance	Pouvoirs publics, acteurs de la recherche, acteurs privés, instituts citoyens	Registres sur les rejets et transferts dans l'environnement de produits chimiques toxiques (<i>Pollutant Release and Transfer Registers (PRTRs)</i>) provenant d'installations industrielles (ex. UE, Australie, Japon, Canada, États-Unis) : utilité pour suivre les performances environnementales des installations, pour évaluer l'efficacité des programmes, et stimuler les initiatives volontaires (UNEP, 2010). - Dans l'UE : <i>European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)</i> (Données de <i>European Environment Agency</i>) Rapports de la Commission Européenne sur la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) et de la directive « Inondations » (2007/60/CE) (European Commission, 2025). Projet européen GEMAS (<i>Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil of Europe</i>) incluant des données de concentration en Cd dans les sols	Réseau de mesures de la Qualité des Sols (RMQS) Base de données sur les sols urbains (BDsolU) Base de données sur les éléments traces métalliques réglementaires sur les terrains recevant des boues de stations d'épuration (BDETM) Base de données de la qualité de l'air nationale (LCSQA Geod'Air) Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du littoral (ROCCH) Données d'émissions atmosphériques en Cd (CITEPA) Base de données Sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) (ex BASOL) Base de données Pollution des sols, SIS et anciens sites industriels (BASIAS) Base de données sur les eaux superficielles (Naïdes)

		Base de données de qualité de l'air européenne (EMEP EBAS)	
Accompagnement à la maîtrise du risque	Pouvoirs publics, acteurs du territoire	Exemple en Nouvelle Zélande (Gray et Cavanagh, 2022) : de dispositifs de maîtrise du risque prenant appui sur la <i>National Environmental Standard for Assessing and Managing Contaminants in Soil for the Protection of Human Health</i> (NES-CS) ainsi que des cadres plus larges de protection de la faune et de la flore. <i>Concernant les restrictions d'usage des sols agricoles ou zones aquacoles pollués au cadmium : voir section 6.3.2</i>	Exemples d'outils : Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués (DGPR, 2011) : raisons, acteurs, données requises, outils et procédures. Indications de mesures de gestion du risque en cas de dépassement de valeurs repères pour le Cd dans les sols pollués (HCSP, 2022). Guide méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (DGPR, 2017). Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement (DGPR, 2024). <i>Concernant les restrictions d'usage des sols agricoles ou zones aquacoles pollués au cadmium : voir section 6.3.2</i>
Technologies de remédiation	Acteurs concernés par les SSP, prestataires spécialisés	Publications scientifiques présentant des options de phyto-remédiation et remédiation chimique dans les sols et eaux polluées (Genchi et al., 2020) et techniques de détections associées (Irfan et al., 2021). <i>Concernant la remédiation du Cd dans les sols agricoles pollués ou jardins potagers : voir section 6.3.2</i>	<i>Concernant la remédiation du Cd dans les sols agricoles pollués ou jardins potagers : voir section 6.3.2</i>

SSP : sites et sols pollués

6.3.3.3 Conclusion sur l'identification de mesures concernant les activités industrielles, liées aux services, aux transports, les produits manufacturés, les déchets et leur recyclage

Considérant :

- En premier lieu, une contribution moindre à l'exposition au cadmium de la population générale des sources industrielles, liées aux services, aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage du fait :
 - o qu'il s'agit de sources mineures à l'imprégnation humaine au cadmium (contribution < 2%, cf. chapitre 5) via l'exposition par l'air et les poussières par les voies d'inhalation, d'ingestion et de contact cutané, après agrégation de toutes sources et voies d'exposition confondues pour la population générale fumeuse et non-fumeuse, hors milieu professionnel ;
 - o d'un flux d'apport en cadmium plus faible dans les sols agricoles par les dépôts atmosphériques (14%) comparativement aux intrants agricoles (>80%) identifiés dans de précédents travaux (cf. chapitre 4, Belon et al. ; 2012 ; Anses, 2019a) ;
- En second lieu, le constat d'une réduction en France des émissions industrielles de cadmium dans les écosystèmes durant la dernière décennie, avec une diminution des émissions industrielles dans l'air et dans l'eau, respectivement de 48 % et 69 % en 10 ans ;
- En troisième lieu, que les observations précédentes résultent du renforcement des obligations réglementaires liées à l'usage industriel de cadmium ou à son rejet dans l'environnement (visant notamment les ICPE en France), et liées au traitement ou au recyclage des déchets contenant du cadmium ; et que, l'amélioration, en Europe, des articles sur le marché notamment grâce au règlement REACH (autorisation et restrictions en lien avec le cadmium dans les produits manufacturés, obligations de déclaration / information) renforce les actions de réduction de cadmium ;
- En quatrième lieu, l'existence de dispositifs de surveillance et gestion de la pollution des milieux (air, eaux), nécessitant d'être encouragés pour tous les milieux et renforcés, notamment pour les sols et l'air intérieur,

Le GT n'approfondira pas l'analyse ciblée d'options d'action pour la population générale concernant ces sources d'exposition par les activités industrielles, liées aux services, aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage dans le chapitre 7. Cependant, le GT recommande :

- De renforcer encore la communication sur l'importance en Europe d'utiliser des articles fabriqués dans le respect des normes européennes protectrices.
- Concernant les certifications des produits manufacturés et l'information des utilisateurs, que ce type d'options d'action puisse s'appuyer sur une médiation scientifique large afin que les acteurs concernés soit clairement informés et, concernant le secteur privé, que des engagements soient pris dans le cadre d'une démarche de responsabilité sociale des entreprises (RSE).
- Concernant la pollution atmosphérique par les ICPE, que des recherches complémentaires puissent être faites sur les sources d'émission. Par ailleurs, pour cibler les actions mises en place, il apparaîtrait utile d'identifier les sous-catégories

d'activités industrielles les plus contributrices et de distinguer « quantité de rejets » et « dangerosité », pour identifier les aspects les plus préoccupants.

- D'améliorer la compréhension et la gestion des émissions de cadmium liées aux transports.

Par ailleurs, il est recommandé de pouvoir estimer la contribution de ces sources dans le cadre d'une exposition professionnelle, afin d'identifier des options d'action visant à prévenir la santé des travailleurs.

6.3.4 Mesures concernant les produits du tabac à fumer

Pour rappel, le tabagisme est une source supplémentaire, bien documentée, d'exposition au cadmium. Tel qu'indiqué dans le chapitre 4, la présence du cadmium dans les produits du tabac à fumer tient à plusieurs facteurs. Le tabac est une plante exigeante en phosphore, et les engrais minéraux phosphatés, utilisés pour améliorer le rendement, sont une source de cadmium. Or, la plante de tabac est capable d'absorber fortement et d'accumuler dans ses feuilles le cadmium présent dans le sol (Pappas, 2011).

Selon FranceAgrimer (2025b), depuis 2017, la France n'a plus de manufacture de produits à fumer et, depuis 2019, la filière tabac n'a plus de filière de première transformation sur le territoire. Les produits du tabac à fumer commercialisés en France sont donc importés.

Compte tenu de la prévalence du tabagisme en France (18% de fumeurs quotidiens chez les adultes de 18-75 ans en France hexagonale en 2024), le tabac à fumer demeure une source essentielle à considérer dans l'évaluation de l'exposition au cadmium (cf. chapitre 4).

D'après les résultats du chapitre 5, la caractérisation de la contribution de la source tabagique à l'imprégnation humaine au cadmium indique que, chez les fumeurs, elle peut expliquer jusqu'à 43% de l'imprégnation selon la période de la vie. Le tabagisme constitue donc une source additionnelle majeure à l'imprégnation humaine au cadmium pour la population générale française fumeuse. De plus, il est constaté que les niveaux de cadmiurie de la population française fumeuse sont plus élevés, voire presque doublés par rapport à la population non-fumeuse.

Ainsi, dans cette section sont plus particulièrement identifiées des options d'action relatives au cadmium dans les produits du tabac à fumer, en distinguant d'une part les réglementations et les normes, et d'autre part les pratiques et techniques pour prévenir l'exposition.

6.3.4.1 Réglementation et normes

Tel qu'indiqué dans le chapitre 4, compte-tenu du très grand nombre de composés toxiques présents dans le tabac, il est difficile d'établir la part de chacun dans les effets sanitaires induits par le tabagisme et le tabagisme passif, et donc d'estimer la part imputable au cadmium dans le fardeau sanitaire du tabac. **La seule recommandation de santé publique consiste à dissuader les individus de fumer et/ou à les encourager à réduire et arrêter de fumer dès que possible.**

En ce sens, il existe un vaste panel de mesures réglementaires recommandées ou mises en place par les pouvoirs publics. Il ne s'agit pas ici d'en faire un inventaire exhaustif, mais il est possible, à titre illustratif, de renvoyer à la diversité de mesures préconisées à l'échelle internationale dans la Convention-cadre de l'OMS pour la lutte antitabac (CCLAT) (OMS, 2003). A l'échelle européenne, la Directive 2014/40/UE relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres en matière de fabrication, de présentation et de vente des produits du tabac et des produits connexes inclut diverses dispositions (p.ex. présentation des images chocs sur les produits, limitation sur la teneur en nicotine). En France, une série de mesures de lutte contre le tabac et le tabagisme passif, généralement portées par des lois (ex. Veil 1976, Evin 1991) et des politiques de santé publique (plans cancer, loi de santé publique de 2004, Programme national de lutte contre le tabac) ont par exemple conduit à des hausses répétées du prix du paquet de cigarettes, au remboursement des substituts nicotiniques, à des interdictions de fumer dans les lieux publics, les parcs, les aires de jeux, et les plages, à l'interdiction d'arômes et additifs dans les produits,

à des stratégies de marketing social (opération « mois sans tabac »), et à la constitution du Fonds de prévention du tabagisme (2016) devenu « Fonds de lutte contre les addictions liées aux substances psychoactives » (article L. 221-1-4 du code de la Sécurité sociale) (Santé publique France, 2025).

Parmi ces mesures, la présente recherche documentaire **n'a pas conduit à identifier de mesure réglementaire ou de norme qui serait spécifique au cadmium dans les produits du tabac à fumer**. S'agissant de prévenir l'exposition tabagique au cadmium, l'OMS (2019) inclut une recommandation générale de « mise en œuvre de la Convention-cadre de l'OMS pour la lutte antitabac, notamment en prévoyant une protection contre l'exposition à la fumée de tabac dans les lieux de travail intérieurs, les transports publics, les lieux publics intérieurs et, le cas échéant, d'autres lieux publics ».

Néanmoins, tel qu'indiqué dans le chapitre 4, à défaut de pouvoir quantifier la part imputable au cadmium dans le fardeau sanitaire du tabagisme, des publications scientifiques mettent en évidence des effets sanitaires néfastes du cadmium dans le tabac (Richter et al., 2017 ; Kim et al., 2023), et des organisations listent le cadmium dans le tabac comme une substance prioritairement préoccupante. Le cadmium fait partie de la liste des 93 constituants nocifs et potentiellement nocifs identifiés par la FDA dans les produits de tabac. Aux États-Unis, la loi (FD&C Act, amendée par le Tobacco Control Act) prévoit que les fabricants et importateurs de tabac doivent déclarer à la FDA les quantités de composants nocifs (HPHC) contenus dans leurs produits de tabac, y compris dans la fumée, par marque et sous-marque. Toutefois, en pratique, la FDA exerce une discrétion d'application et, selon ses lignes directrices de 2012, se concentre pour l'instant sur un sous-ensemble de 20 constituants — parmi les 93 potentiellement identifiés — pour lesquels les méthodes de mesure sont bien établies. Le cadmium fait également partie de la *“non-exhaustive priority list of toxic contents and emissions of tobacco products”* de l'OMS incluant 39 substances (WHO, 2015). Par ailleurs, le cadmium est une substance inscrite dans la réglementation européenne « classification, étiquetage, emballage » (CLP) en vigueur sur la classification et l'étiquetage des produits sur le marché européen, sur la base d'une substance ayant fait l'objet d'une classification « cancérogène, mutagène, et toxique pour la reproduction » (CMR). Sous la forme d'oxyde de cadmium, elle est classée CMR 1B⁷¹ pour la cancérogénicité et 2⁷² pour la mutagénicité et la reprotoxicité selon le règlement CLP 1272/2008 (en vigueur, mis à jour en 2023).

A ce titre, le GT s'est interrogé sur l'existence éventuelle de leviers d'action sur la présence de cadmium (comme d'autres substances prioritairement préoccupantes) dans les produits du tabac à fumer. Tel que précédemment mentionné, à l'échelle française, ces produits étant importés, il existe a priori peu ou pas de leviers réglementaires relatifs à la culture, à la transformation et la fabrication de produits du tabac à fumer en France. Toutefois, pour ce qui concerne la composition des produits distribués, deux textes ont été identifiés :

- L'article n°9 de la CCLAT (OMS, 2003) portant sur la réglementation de la composition des produits du tabac, indiquant que la Conférence des Parties, en consultation avec les organismes internationaux compétents, « propose des directives pour les tests et l'analyse de la composition et des émissions des produits du tabac, et pour la réglementation de cette composition et de ces émissions ».

⁷¹ Substances dont le potentiel cancérogène pour l'être humain est supposé

⁷² Substances suspectées d'être toxiques pour la reproduction humaine et substances préoccupantes du fait qu'elles pourraient induire des mutations héréditaires dans les cellules germinales des êtres humains.

- L'article n°3 de la directive européenne 2014/40/UE sur les produits du tabac comportant des niveaux d'émissions maximaux de nicotine, monoxyde de carbone (CO), goudron, compte tenu de leur toxicité ou de l'effet de dépendance que ces substances engendrent ; cette directive ouvre la possibilité aux Etats membres d'ajouter des substances et de faire évoluer les méthodes de mesure des substances pour lesquelles des limites dans les émissions peuvent être fixées, selon les normes convenues par les parties à la CCLAT ou par l'OMS.

A la lumière de ces textes, le GT considère que les implications et conséquences d'une mesure qui ciblerait la **teneur en cadmium dans les produits du tabac à fumer ou leurs émissions** pourraient être plus précisément étudiées.

Quelle que soit l'issue de cette analyse, le GT attire l'attention sur le fait que la **lutte anti-tabac est la priorité**, et qu'une **vigilance serait requise dans la communication** sur une telle mesure : elle ne devrait en aucun cas donner l'impression aux fumeurs qu'il y aurait moins de risque à fumer une cigarette comportant moins de cadmium, compte-tenu de la nocivité des autres composants.

6.3.4.2 Pratiques et techniques

Les activités de production et de transformation de tabac ne se déroulant pas en France, les options d'action sur la teneur en cadmium dans les produits du tabac à fumer ou leurs émissions concerneraient *de facto* la culture de tabac et la fabrication de produits ailleurs dans le monde, avant qu'ils ne soient importés et commercialisés en France.

A cet égard, quelques articles scientifiques (dont certains publiés par l'industrie du tabac) attestent que la teneur en cadmium dans les feuilles de tabac et les techniques susceptibles de l'abaisser ont fait l'objet de travaux. Selon ces sources, les techniques en question portent sur la sélection de variétés qui « transportent » moins facilement le cadmium des racines aux feuilles, certains modes de culture, des techniques d'assainissement du sol (avec un coût élevé pour les surfaces très polluées) ou des procédés de traitement des feuilles de tabac (Lugon-Moulin et al., 2004 ; Liu et al., 2019 ; Degola et al., 2015).

6.3.4.3 Conclusion sur l'identification de mesures concernant les produits du tabac et produits connexes

Considérant le fait que :

- Le tabac constitue une source additionnelle majeure à l'imprégnation humaine au cadmium pour la population générale française fumeuse (contribution jusqu'à 43% de l'imprégnation humaine au cadmium) ;
- Un grand nombre de composés toxiques se trouvent dans le tabac, dont le cadmium, qui fait partie de la liste des 93 constituants nocifs et potentiellement nocifs identifiés par la FDA dans les produits de tabac ;
- Le GT considère que la lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif reste la priorité (dissuader les individus de fumer et/ou les encourager à réduire et arrêter de fumer dès que possible) et, qu'à cette fin, il existe un vaste panel de mesures réglementaires recommandées ou mises en place par les pouvoirs publics.
- Les produits du tabac à fumer commercialisés en France sont importés ;
- Aucune mesure réglementaire ou de norme spécifique au cadmium dans les produits du tabac à fumer n'a été identifiée à l'échelle européenne ou française, mais il existe

des leviers concernant la composition / les émissions des produits du tabac (article n°9 de la CCLAT (OMS, 2003), et article n°3 de la directive européenne 2014/40/UE (teneurs d'émission maximales en nicotine, CO, goudrons)) ;

Le GT apportera un éclairage complémentaire, dans le chapitre 7, sur les enjeux relatifs à l'instauration d'une teneur maximale en cadmium dans les cigarettes ou d'un niveau maximal d'émission des cigarettes pour le cadmium, avec une vigilance requise dans la communication sur cette mesure, pour éviter l'écueil de donner l'impression qu'il existerait des produits moins dangereux que d'autres.

6.3.5 Mesures de prévention secondaire et de prise en charge des individus exposés

Comme cela a été présenté dans le chapitre 2, le cadmium provoque des effets osseux de type déminéralisation, entraînant un risque augmenté de fractures. De plus, le cadmium est principalement toxique pour les reins et son accumulation peut provoquer un dysfonctionnement rénal. En cas d'exposition prolongée ou importante, ce dysfonctionnement est susceptible d'évoluer vers une insuffisance rénale (Anses, 2019a). Par ailleurs, le cadmium peut également entraîner d'autres effets sanitaires comme des effets reprotoxiques, tératogènes (impacts neuro-développementaux) ou encore cardiovasculaires (Anses, 2019a). Il est aussi suspecté de jouer un rôle dans l'incidence de certains cancers (hormono-dépendant, testiculaire, prostatique, rénal, pancréas, etc.) (Anses et al. ; 2019 ; Oleko et al., 2021).

A des fins de surveillance de la santé de la population, de précédents travaux de l'Anses ont conduit à l'élaboration de valeurs toxicologiques de référence par ingestion et de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (urines) (Anses, 2017, Leconte et al., 2021). Par ailleurs, la seconde étude de biosurveillance Esteban (2014-2016) a permis de mesurer les niveaux d'imprégnation au cadmium de la population française continentale âgée de 6 à 74 ans entre avril 2014 et mars 2016 (Santé Publique France, 2021).

En parallèle de ces dispositifs et outils, sur le plan clinique, il apparaît essentiel de pouvoir dépister et d'agir auprès des personnes exposées, afin de prévenir, limiter ou traiter les effets éventuels du cadmium sur leur santé par des services de santé et des soins adaptés.

Sur cet enjeu, la recherche documentaire indique l'existence de travaux académiques. Par exemple, des synthèses de connaissances mentionnent des mesures de réduction de l'exposition au cadmium *via* des pratiques alimentaires préventives (p.ex. préparation et cuisson de certains aliments), l'installation de filtres à air intérieur dans le logement, la prise de suppléments nutritionnels ou des traitements médicaux pour réduire les effets du cadmium dans l'organisme (Sripada et al., 2022 ; Schaefer et al., 2020 ; Zhai et al., 2015). Néanmoins, ce domaine d'action relevant d'une expertise biomédicale, il n'entre pas dans le périmètre de cette auto-saisine et du champ de compétences du GT.

Il est néanmoins à noter qu'en 2024, la Haute Autorité de Santé (HAS) a publié des recommandations sur le dépistage, la prise en charge et le suivi des personnes potentiellement surexposées au cadmium du fait de leur lieu de résidence. Cela inclut une recommandation de bonne pratique à l'intention des professionnels de santé et des usagers, pour le dépistage, la prise en charge et le suivi des populations résidant sur des sites à risque de pollution par le cadmium (HAS, 2024).

Ces enjeux n'ont pas été analysés par le GT, l'auto-saisine se concentrant sur les pollutions diffuses à l'échelle de la population générale, et non sur l'exposition au cadmium de populations résidant sur des sites pollués. Néanmoins, il est d'intérêt de signaler que de précédents travaux de l'Anses ont produit des valeurs sanitaires de référence pour le cadmium. Toutefois, la VTR interne ainsi que les valeurs repères biologiques par classe d'âge ne sont en aucun cas un indicateur de l'état de santé d'une personne. Elles ne peuvent donc pas être utilisées pour interpréter un dosage de cadmiurie ou pour piloter le suivi médical d'un individu. Il convient de noter que ces valeurs sont des valeurs populationnelles, qui peuvent servir de point de départ, sans pour autant les confondre, à des dispositifs de suivi individuels.

En conclusion, considérant le fait que :

- Ce domaine d'action relève d'une expertise biomédicale,
- Ce domaine d'action se situe en dehors du périmètre de l'auto-saisine et du champ de compétences du GT,

Le GT n'approfondira pas l'analyse ciblée d'options de prévention secondaire et de prise en charge des individus. Néanmoins, bien que ceci n'entre pas dans le périmètre de cette expertise, il est souligné que valeurs repères biologiques par classe d'âge ne peuvent pas être utilisées pour interpréter un dosage de cadmiurie à l'échelle individuelle, pour piloter le dépistage ou le suivi médical, pour lequel une approche spécifique doit être mise en œuvre.

6.4 Conclusion sur l'identification d'options d'action

Ce chapitre a eu pour objectif d'identifier une pluralité de mesures existantes ou discutées dans la littérature pour maîtriser les risques liés à l'exposition de la population générale au cadmium. Tel que résumé sur la **Figure 26** ci-dessous, ce travail d'identification a porté sur cinq domaines d'action avec pour chacun, le repérage d'options d'action relevant d'approches, de pratiques, de techniques ou de réglementations spécifiques, susceptibles, *in fine*, de contribuer à réduire l'exposition et l'imprégnation de la population en fonction de caractéristiques individuelles (âge, pratiques et modes de vie, etc.).

A la lumière du périmètre de l'auto-saisine, des précédents chapitres portant notamment sur la modélisation de l'exposition agrégée et la prédiction de la cadmiurie de la population générale française au cadmium, et du panorama d'options d'action présentées dans ce chapitre, le GT présente, dans le prochain chapitre, un éclairage complémentaire sur cinq cibles d'action d'intérêt :

- La réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire (contamination des aliments)
- La réduction des apports en cadmium en agissant sur les matières fertilisantes
- L'évolution des pratiques agricoles
- L'amélioration du contrôle et de la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires
- La réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique.

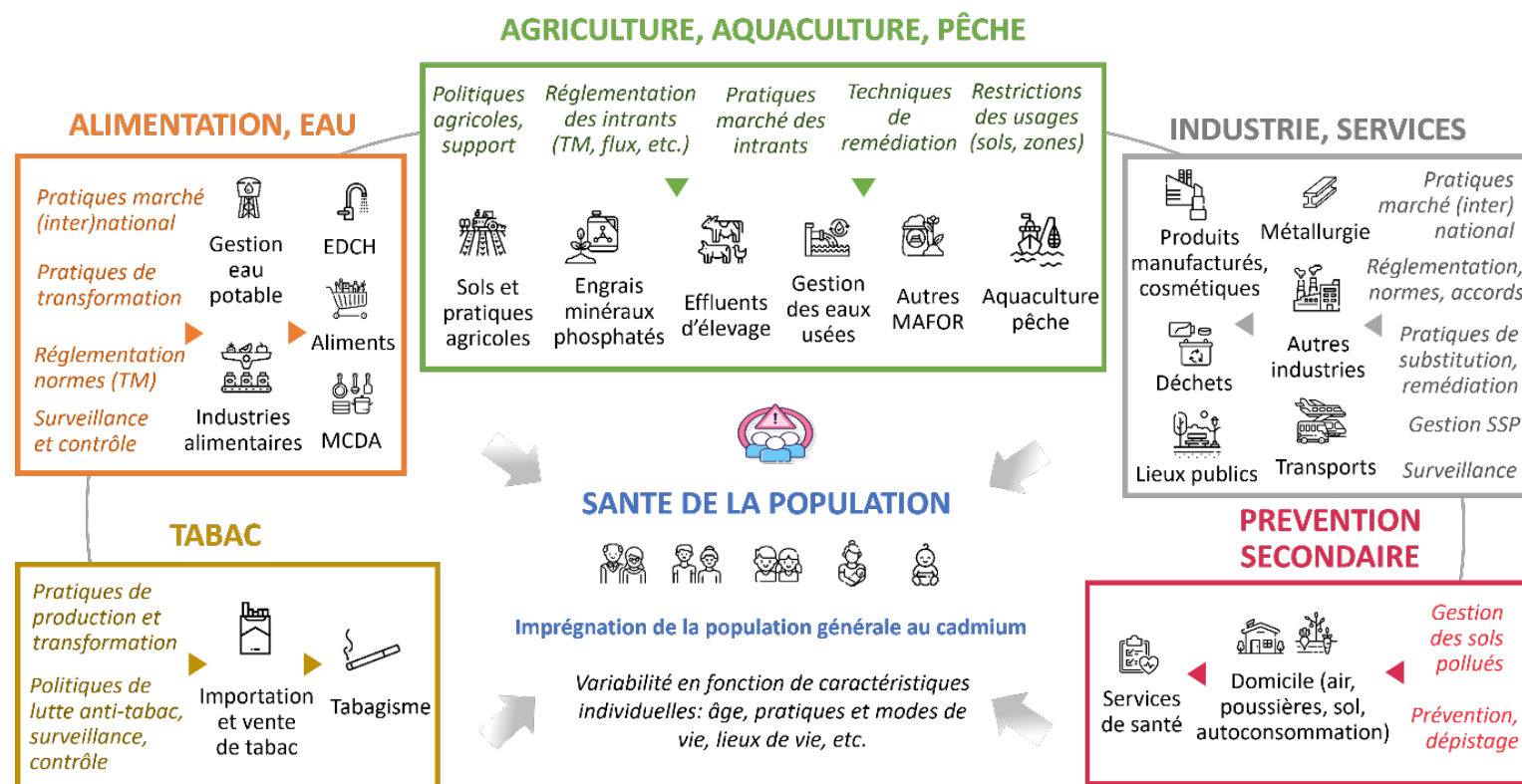


Figure 26. Domaines (encadrés) et options d'action (*italique*) identifiés par le GT pour réduire l'imprégnation au cadmium de la population générale

7 Eclairage complémentaire sur des cibles et options d'action d'intérêt

7.1 Cadre général et objectifs

Le chapitre 6 a permis d'identifier une pluralité de mesures⁷³ déjà en place ou discutées dans la littérature pour maîtriser les risques liés à l'exposition de la population générale au cadmium. Il souligne des actions mises en place en France, en Europe ou à l'international compte tenu :

- (i) des principales sources et voies d'exposition au cadmium (chapitre 4)
- (ii) des résultats de la modélisation de l'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie de la population générale française au cadmium (chapitre 5), confirmant, que l'alimentation (notamment les pommes de terre, les produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), et les légumes) ainsi que le tabagisme (chez les fumeurs), sont les principaux contributeurs à l'exposition cumulée au cours de la vie.

En conclusion du chapitre 6 ont donc été identifiées **cinq cibles d'action que le GT considère d'intérêt particulier**, faisant l'objet, dans le présent chapitre, d'un éclairage complémentaire dans une sous-section dédiée (7.3.1 à 7.3.5).

D'une part, quatre cibles renvoient à des **secteurs d'activités** tout au long de la **chaîne de production des denrées alimentaires**, depuis le secteur des intrants agricoles jusqu'aux denrées alimentaires, incluant les pratiques agricoles, ainsi que les activités de contrôle et de surveillance qui y sont associées (cf. **Figure 27**).

⁷³ Les termes « mesure » et « option d'action » sont utilisés de façon interchangeable dans ce chapitre.

7.3.2. Réduction de l'apport en cadmium en agissant sur les MFSC

→ Abaissement des limites réglementaires en Cd dans les MFSC et voies d'applications (approvisionnement en produits à moindre concentration en Cd, décadmiation...)

→ Incitations à la réduction de la concentration en cadmium dans les MAFOR

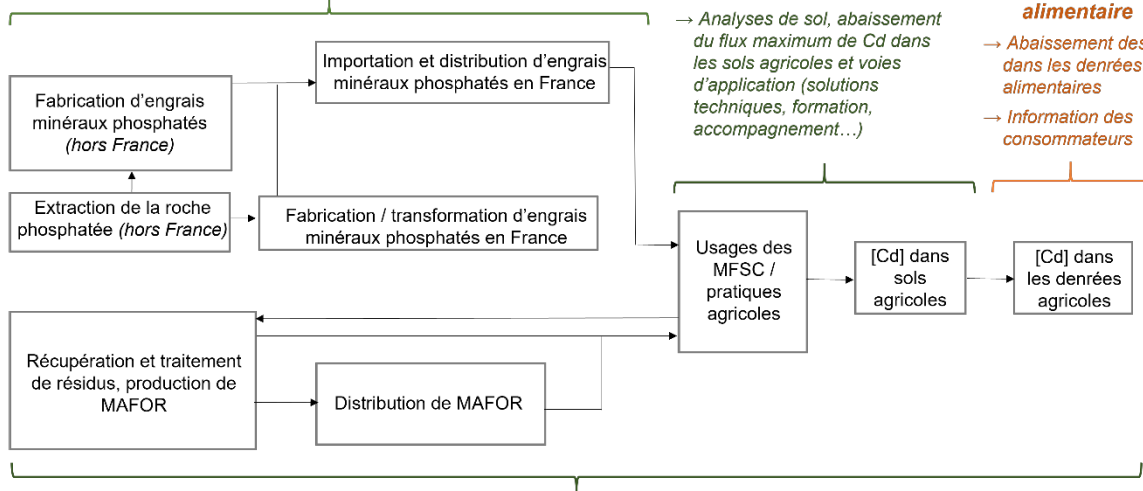


Figure 27. Cibles d'action (7.3.1 à 7.3.4) et options d'action associées (→ en italique) le long de la chaîne de production des denrées alimentaires

Légende : [Cd] : concentration en cadmium ; MFSC : matières fertilisantes et supports de culture ; MAFOR : matières fertilisantes d'origine résiduaire : boues de STEP, effluents d'élevage, composts, digestats de méthanisation...

D'autre part, une cinquième cible renvoie à la **réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique**. Cette cible renvoie à la lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif, qui dépasse la seule problématique du cadmium et ne sera donc pas détaillée (cf. 6.3.4.1). Toutefois, les implications d'une teneur maximale ou d'un niveau maximal d'émission de cadmium dans les produits du tabac importés et vendus en France seront abordées (cf. **Figure 28**).

7.3.5. Réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique

→ Politiques de lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif

→ Etude sur la pertinence d'une teneur maximale ou d'un niveau maximal d'émission de cadmium dans les cigarettes

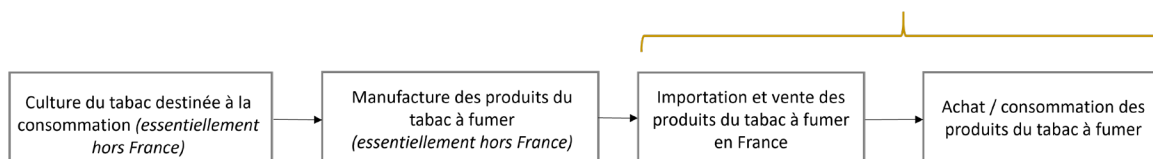


Figure 28. Cible d'action (7.3.5) associée aux produits du tabac et options d'action associées (→ en italique)

L'objectif du chapitre 7 est d'apporter un **éclairage complémentaire** sur les **options d'action relatives à ces cinq cibles**.

7.2 Méthodes

Pour réaliser ce travail, le GT a pris appui sur le **référentiel méthodologique d'analyse socio-économique d'options d'action (ASEOA)** en cours d'expérimentation à l'Anses⁷⁴. Ce référentiel, dont l'utilisation demeure indicative et flexible en fonction des besoins des collectifs d'experts, propose une démarche en quatre étapes (cf. section 6.1). Après avoir analysé la situation à risque (étape 1, chapitres 2, 4, 5), identifié les domaines d'action et la pluralité des options d'action envisageables (étape 2, chapitre 6), la troisième étape consiste ici à **analyser les impacts potentiels d'une sélection d'options d'action** (réglementation, information, incitation...) **sur les sources et voies d'exposition de la population, en tenant compte des enjeux associés à leur mise en œuvre (faisabilité, coût)**.

Pour cela, une **analyse aussi documentée que possible de chaque option d'action a été menée**. Il ne s'agissait pas de réaliser une analyse quantitative comparant tous les impacts de chaque option. **En effet, dans le délai imparti, mais aussi compte tenu du manque de données nécessaires pour identifier, documenter, quantifier ces impacts, voire leur attribuer une valeur monétaire, il est apparu plus pertinent au GT de proposer une analyse documentaire des cibles d'action et une synthèse de connaissances sur les principales implications des options d'action associées**, en prenant appui sur **des données quantitatives ou qualitatives disponibles**. Ce travail vise ainsi à **éclairer les acteurs concernés** dans le choix des options d'action à mettre en place.

Pour cela, le GT s'est attaché à la consultation et à l'analyse thématique d'une **diversité de sources d'informations** scientifiques et contextuelles permettant d'apprécier, en France, les impacts potentiels et les enjeux de mise en œuvre associés aux différentes options d'action.

7.2.1 Sources de données

L'analyse s'est appuyée en premier lieu sur des données scientifiques formalisées (articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, rapports d'agences ou d'institutions nationales et internationales), ainsi que sur la littérature grise, et sur des données et questionnements portés par des parties-prenantes à partir de leurs expériences (auditions de différents acteurs des organisations citées en section 1.2.1.4).

Ce faisant, le GT a porté attention aux effets des options d'action documentés dans la littérature, et aussi au contexte dans lequel les options d'action sont ou seraient déployées en France (ex. types d'acteurs, de territoires...), contexte participant de leur pertinence et de leur applicabilité.

- **Littérature scientifique et littérature grise**

La recension de la littérature pertinente s'est appuyée sur diverses sources :

- Recherche bibliographique sur Pubmed, Scopus, Science Direct et recherche de littérature grise sur les mesures de maîtrise / atténuation de l'exposition au cadmium (cf. chapitre 6, section 6.2.1).
- Recherches bibliographiques complémentaires par mots-clés sur ces mêmes bases, pour approfondir la littérature académique et la littérature grise sur certaines options (ex. décadmiation de la roche phosphatée).

⁷⁴ Version endossée par le CES ASE le 30 Mai 2024.

- Consultation de sites d'organismes de référence en lien avec les options d'action (Plateforme de la surveillance de la Chaîne alimentaire, AGRESTE, FranceAgriMer, etc.).
- Sources documentaires identifiées suite aux auditions.

• Auditions d'acteurs concernés

En complément de la recension documentaire, le GT a identifié les secteurs d'activité et types d'acteurs à auditionner pour compléter le panorama des actions appliquées ou envisageables, renseigner leurs effets, enjeux de mise en œuvre et les questionnements qu'elles suscitent.

Sept auditions ont été conduites entre février et avril 2025, à partir d'une liste de questions préparées par le GT et communiquées en amont aux participants. Les acteurs rencontrés et les grandes thématiques abordées figurent dans le **Tableau 24**.

Tableau 24. Acteurs auditionnés et principales thématiques abordées

Secteurs	Acteurs pressentis	Thématiques
Réglementation en lien avec le cadmium dans les denrées alimentaires et intrants agricoles	DGAL , Bureau d'appui à la maîtrise des risques alimentaires (BAMRA)	• Réglementation sur les teneurs en cadmium dans les sols, intrants agricoles et denrées alimentaires • Autres mesures possibles (accompagnement, incitation, information...) impliquant divers acteurs
	DGAL , Bureau des intrants et du biocontrôle (BIB)	
Production et distribution de MFSC	UNIFA	• Production, distribution et utilisation d'engrais minéraux phosphatés / MAFOR en France • Options d'action susceptibles de réduire la concentration en cadmium dans les MFSC et l'apport en cadmium dans les sols agricoles en France
	Afaïa	
	SYPREA	
	FEDENE	
Pratiques agricoles en lien avec la fertilisation et le transfert sol-plante du cadmium	COMIFER	• Pratiques actuelles des acteurs du secteur en lien avec la problématique du cadmium • Options d'action susceptibles de réduire l'apport en cadmium dans les sols agricoles et sa présence dans les denrées agricoles en France

Légende : MFSC : matières fertilisantes et supports de culture ; Afaïa: syndicat professionnel représentant les entreprises qui fournissent les matières fertilisantes et intrants innovants des cultures végétales durables : supports de culture, paillages, amendements organiques, engrais organiques et organo-minéraux et biostimulants; COMIFER: Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée ; FEDENE: Fédération professionnelle des entreprises de services pour l'énergie et l'environnement ; SYPREA: Syndicat des Professionnels du recyclage par valorisation Agronomique ; UNIFA: Union des Industries de la Fertilisation ; MAFOR : matières fertilisantes d'origine résiduaire.

- **Consultations d'équipes de l'Anses spécialisées**

Enfin, plusieurs unités de l'Anses spécialisées sur des sujets en lien avec les options d'action étudiées ont été ponctuellement consultées :

- Unité résidus et sécurité des aliments (URSA, DEPR) ;
- Unité coordination des intrants du végétal (UCIV, DEPR) ;
- Unité évaluation des produits du tabac et produits connexes (UETPC, DER).

7.2.2 Analyse thématique

Les documents du corpus documentaire initialement constitué (cf. 6.2.1) ont été répartis par cible d'action, puis une extraction des informations-clés relatives aux diverses options d'action a couvert deux types d'informations, lorsqu'elles étaient disponibles :

- Impacts de l'action (réduction du risque sanitaire, autres conséquences)
- Applicabilité de l'action (implications techniques, socio-économiques, organisationnelles...)

Les informations-clés issues des documents identifiés et l'analyse thématique des auditions ont été intégrées à la réflexion du GT et à la synthèse présentée dans la section suivante.

Dans la mesure du possible, l'analyse donne lieu à la formulation par le GT de recommandations et perspectives (incertitudes, pistes de recherche), qui sont résumées en conclusion de ce chapitre (cf. 7.4).

7.3 Analyse des cibles et options d'action

L'analyse des cibles et options d'action retenues pour être approfondies par le GT est structurée en cinq sous-sections.

La première cible abordée est la **réduction de l'exposition du consommateur au cadmium par la voie alimentaire**, identifiée comme majeure (7.3.1). A cet effet, deux options d'action sont présentées : l'abaissement des teneurs maximales en cadmium dans les aliments sur une base sanitaire, et l'information des consommateurs.

De façon complémentaire, le GT a identifié deux autres cibles en amont, au niveau agricole, pour réduire la teneur en cadmium dans les denrées alimentaires.

Le GT a tout d'abord focalisé sa réflexion sur **la réduction de la concentration en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC)**, seconde cible étudiée (cf. 7.3.2). Un éclairage est apporté sur l'abaissement de la limite réglementaire en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés et, pour y parvenir, sur les possibilités d'approvisionnement en phosphate à moindre concentration en cadmium et/ou de recours à des procédés de décadmiation. Pour les autres types d'engrais, les amendements, ainsi que les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR), des limites réglementaires ou incitations à la réduction de la concentration en cadmium sont aussi abordées.

Ensuite, la troisième cible approfondie est **l'évolution des pratiques agricoles afin de limiter les apports de cadmium dans les sols et son transfert dans les denrées produites** (cf. 7.3.3). Pour cela, le besoin d'analyse des sols et l'abaissement du flux maximum d'apport en

cadmium dans les sols agricoles est évoqué, ainsi que les solutions techniques pour y parvenir (p.ex. fertilisation au plus près des besoins, pratiques agro-environnementales pour remobiliser le phosphore stocké dans les sols). Les besoins de formation, d'accompagnement et de collaboration entre les acteurs concernés sont également abordés. Néanmoins, le GT souligne que la **question plus large des besoins en phosphore, qui renvoie à la gestion d'une ressource critique pour l'agriculture, aux enjeux de production agricole et de souveraineté alimentaire notamment, relevant de la politique agricole nationale, dépasse le périmètre de l'auto-saisine** (Centre d'Etudes et de Prospective du Ministère de l'Agriculture, 2016). Il tient néanmoins à souligner les enjeux d'une prévention des risques localisée, notamment dans le cas de l'auto-production en jardins potagers : les leviers d'action généralement mobilisés ou préconisés dans ce cas font l'objet de l'annexe 7.

La quatrième cible consiste en **l'amélioration du contrôle et de la surveillance le long de la chaîne de production des denrées alimentaires** (7.3.4), aux niveaux de la mise sur le marché des MFSC, des pratiques agricoles, et des denrées alimentaires.

Enfin, la cinquième cible abordée est la **réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique** (7.3.5). Outre les options d'action relevant plus globalement de la lutte anti-tabac, les implications d'un(e) éventuel(le) teneur maximale ou niveau maximal d'émission en cadmium dans les cigarettes et autres produits du tabac sont présentées.

7.3.1 Réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire

Cette section aborde la réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire, que ce soit pour la population générale française ou plus spécifiquement pour des individus dépassant la valeur toxicologique de référence (VTR) interne⁷⁵. Pour rappel, le GT a conclu que les principaux contributeurs à l'exposition alimentaire au cadmium (pommes de terre, produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), légumes) sont des aliments du régime alimentaire de base. De fait, les leviers d'action majeurs sur la problématique du cadmium se situent en amont de la contamination des denrées alimentaires pour agir sur leur niveau de contamination. Les **teneurs maximales en cadmium dans les denrées** constituent un levier dans cette direction : le caractère insuffisamment protecteur des teneurs maximales réglementaires (TM) actuelles et l'intérêt d'engager une réflexion sur les façons de les abaisser sont évoqués (7.3.1.1). A titre complémentaire, l'opportunité **d'actions d'information spécifiques** visant les forts consommateurs de denrées alimentaires très contaminées et/ou de denrées qui dépassent fréquemment les TM est considérée (7.3.1.2).

7.3.1.1 Abaissement des teneurs maximales en cadmium dans les denrées

7.3.1.1.1 *Des TM en cadmium dans les aliments insuffisamment protectrices*

La plateforme de surveillance de la chaîne alimentaire (SCA) a récemment publié un rapport sur la surveillance du cadmium (Plateforme SCA, 2023). En ce qui concerne l'alimentation humaine, ce rapport s'est basé sur des résultats d'analyse de cadmium dans 27 391 échantillons, obtenus entre 2010 et 2019. Ces résultats d'analyse proviennent de 18 jeux de

⁷⁵ La VTR interne intègre l'ensemble des voies d'exposition et tient compte de l'exposition cumulative du cadmium dans l'organisme. En l'état actuel des connaissances, la VTR interne de 0,5 µg CdU g⁻¹ de créatinine est la valeur la plus récente et robuste, quelle que soit les voies d'exposition pour la population générale (cf. 5.2.4.1).

données issus de la surveillance publique (plans mis en œuvre par la DGAL et la DGCCRF, voir également section 7.3.4.1), privée (surveillance réalisée par les professionnels des filières dans le cadre des auto-contrôles réglementaires) ou constitués à l'initiative d'organismes publics et privés à des fins de surveillance volontaire. Ces données ont été mutualisées dans le contexte spécifique des travaux de la plateforme SCA, en tenant compte de leur qualité. Une diversité de matrices alimentaires a été recherchée. Celles-ci ont été regroupées en suivant une catégorisation de niveau détaillé (ex. mollusques), de niveau général (ex. poissons et fruits de mer), ou encore selon une catégorisation réglementaire permettant la comparaison des concentrations en cadmium aux TM (Plateforme SCA, 2023).

Dans ce dernier cas, parmi les résultats (**Figure 29**), les dépassements des TM étaient assez rares pour les denrées végétales. Pour les denrées d'origine animale, les dépassements de TM étaient quasiment systématiques pour les abats (foie et rein d'équins notamment⁷⁶), tandis que le cadmium était non quantifié dans les viandes et charcuteries. Dans une moindre mesure, des dépassements ont aussi été repérés dans les poissons (avec des dépassements plus nombreux pour le thon), les crustacés et les mollusques bivalves.

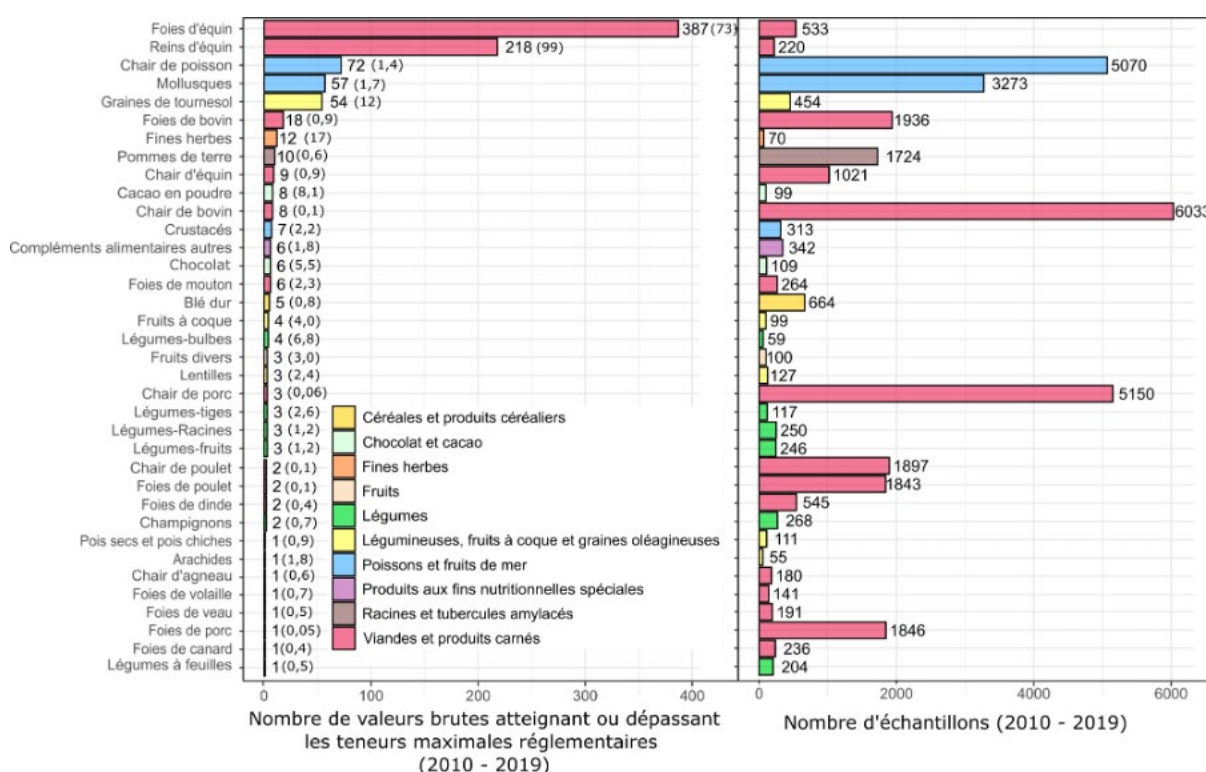


Figure 29. Données de surveillance du cadmium dans les denrées alimentaires.

Lecture du graphique : Le graphique de gauche donne le nombre de résultats bruts (ou entre parenthèses la proportion par rapport au nombre total d'échantillons) atteignant ou dépassant les teneurs maximales fixées par le règlement CE 1881/2006 (alimentation humaine) en vigueur entre 2010 et 2019. Le graphique de droite permet de visualiser le nombre d'échantillons analysés correspondant (Plateforme SCA, 2023).

En ce qui concerne l'exposition de la population au cadmium *via* les denrées alimentaires, la troisième étude de l'alimentation totale (EAT3) montre que les dépassements de la DJT (de $0,35 \mu\text{g (kg pc)}^{-1} \text{ j}^{-1}$) continuent d'être observés pour une proportion non négligeable de la population française, tant chez les enfants (23 – 27 % selon l'hypothèse de traitement de

⁷⁶ Depuis 2019 ces denrées font l'objet d'un retrait systématique à l'abattoir du fait du nombre important de non-conformités (arrêté du 28 juin 2019, cf. section 6.3.1)

données censurées) que chez les adultes (1,4 – 1,7 % selon l'hypothèse de traitement de données censurées), traduisant des expositions inquiétantes en termes de sécurité sanitaire.

Le présent rapport (chapitre 5) montre la contribution majoritaire des denrées alimentaires à l'imprégnation humaine au cadmium (exposition totale, toutes sources confondues), à la fois pour la population générale, fumeuse et non-fumeuse. Il est observé que, rien que par l'alimentation, une part de la population présente des cadmiuries dépassant les valeurs repères biologiques par classe d'âge ainsi que la VTR interne.

L'étude d'imprégnation Esteban réalisée entre 2014 et 2016 a déjà montré une imprégnation de la population française augmentée en 10 ans, avec des taux urinaires moyens de cadmium de 0,27 et 0,57 $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine chez les enfants et les adultes, respectivement. En effet, ces niveaux apparaissent plus élevés que ceux de l'Etude nationale nutrition santé (ENNS) pour les adultes français, réalisée en 2006-2007⁷⁷. Ils peuvent être également jusqu'à trois à quatre fois plus élevés par rapport à ceux de la population américaine adulte et de la population adulte des autres pays européens, respectivement (Oleko et al., 2021). De fait, dans le cadre du projet de recherche HBM4EU (*European Human Biomonitoring Initiative*), une analyse comparative de l'imprégnation de la population européenne au cadmium a été entreprise, à partir d'études réalisées entre 2014 et 2021 dans 9 pays (Islande, Danemark, Pologne, République Tchèque, Croatie, Portugal, Allemagne, France, Luxembourg) à partir d'échantillons de la population adulte (20-39 ans) (n=2510), excluant les *hotspots*. Pour la France, les données individuelles (n=393) étaient issues de l'étude Esteban. Des niveaux d'imprégnation nettement plus élevés ont été observés en France et en Pologne (0,39 et 0,36 $\mu\text{g Cd g}^{-1}$ créatinine, respectivement) comparativement aux autres pays dont l'Allemagne (0,27 $\mu\text{g Cd g}^{-1}$), le Luxembourg (0,18 $\mu\text{g Cd g}^{-1}$) et les autres pays (< 0,13 $\mu\text{g Cd g}^{-1}$). Sur la base des données disponibles, la cadmiurie était plus élevée chez les personnes se disant végétariennes et chez les fumeurs. En utilisant des unités territoriales infranationales, des corrélations positives ont été identifiées entre d'une part les niveaux d'imprégnation au cadmium dans la population et, d'autre part, la proportion de terres cultivées, ainsi que la consommation annuelle d'engrais minéraux phosphatés (kg/km^2)⁷⁸ (Tratnik et al., 2022). Ces résultats confirment d'une part la contribution prédominante des sources alimentaires et tabagiques à l'imprégnation au cadmium à l'échelle européenne, et d'autre part les niveaux d'imprégnation particulièrement élevés observés en France.

Selon l'EAT3 (Anses, 2026) et le chapitre 5 du présent rapport, les denrées agricoles d'origine végétale sont celles qui contribuent majoritairement le plus à l'exposition au cadmium de la population française, notamment les pommes de terre, les produits à base de blé et les légumes, alors que les dépassements de la teneur maximale réglementaire sont très rares pour ces produits (**Figure 29**).

Les rares dépassements de la teneur maximale réglementaire n'expliquent donc pas les dépassements de la VTR interne pour une part significative de la population en France.

⁷⁷ Dans l'ENNS, la concentration urinaire moyenne en cadmium était égale à 0,29 $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine dans la population générale adulte alors que dans l'étude Esteban, pour une population similaire à celle de l'ENNS, la cadmiurie moyenne était de 0,51 $\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine (Oleko et al., 2021).

⁷⁸ Les auteurs relèvent cette association, tout en reconnaissant que le régime alimentaire des personnes échantillonnées n'est pas uniquement basé sur des denrées produites localement et peut inclure des denrées issues d'autres régions. La densité du réseau routier ($\text{km de routes / km}^2$) et les rejets industriels de cadmium (air, eaux) (selon les données du Registre européen des rejets et des transferts de polluants (E-PRTR)) étaient aussi positivement corrélés à l'exposition.

Notons que, dans le rapport de la plateforme SCA, les résultats d'analyse obtenus entre 2010 et 2019 ont été confrontés aux TM en vigueur au moment du prélèvement, ainsi qu'aux TM actualisées en 2021, selon le Règlement (CE) n°1881/2006. A l'heure actuelle, c'est le règlement (UE) 2023/915 qui est en vigueur et les TM pour le cadmium n'ont pas évolué (version consolidée du 1^{er} juillet 2025), depuis la dernière version du Règlement (CE) n°1881/2006⁷⁹.

Force est de constater que les teneurs maximales réglementaires actuelles en cadmium dans les pommes de terre, les légumes, et aussi les produits céréaliers ne sont pas suffisamment protectrices de la santé du consommateur.

Pour les non-fumeurs, les principaux contributeurs à l'exposition (pommes de terre, produits céréaliers (céréales infantiles, pain et produits de panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), légumes) sont à la fois très consommés et constituent pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base. Ainsi, il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés, qui seraient spécifiques au cadmium pour diminuer leur contribution à l'exposition⁸⁰.

C'est pourquoi, **le GT recommande que soit élaborée une méthodologie permettant de fixer des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires garantissant que l'exposition agrégée⁸¹ du consommateur soit inférieure à la VTR interne.** C'est l'objet de la section suivante.

7.3.1.1.2 Révision des teneurs maximales dans les aliments sur une base sanitaire

Dans un précédent rapport, l'Anses (2020a) a préconisé de prendre en compte la contribution à l'exposition au cadmium de l'ensemble des aliments (selon leurs niveaux de contamination et de consommation dans la population), afin de pouvoir proposer de nouvelles teneurs maximales aliment par aliment en tenant compte du crédit toxicologique.

A cet égard, **le GT recommande de réviser à la baisse les teneurs maximales dans les aliments fortement contributeurs, de façon que leurs contributions conjointes à l'exposition n'entraînent pas un dépassement de la VTR interne dans la population.**

Pour ce faire, il convient d'engager une réflexion sur les approches selon lesquelles de telles teneurs maximales pourraient être dérivées. Cette réflexion pourrait aussi s'appliquer à d'autres contaminants chimiques de l'alimentation d'intérêt.

Ce travail dépasse le cadre de la présente auto-saisine. Néanmoins, appliqué au cas du cadmium, **la modélisation d'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie présentée dans le chapitre 5 permet d'alimenter une telle réflexion :**

⁷⁹ Un historique de l'évolution des TM à l'échelle européenne au cours du temps (jusqu'au 31/08/2021), par catégorie d'aliment, figure dans les tableaux présentés en annexe 7 du rapport de la Plateforme SCA (2023, pp. 230-232).

⁸⁰ Il convient de noter, tel que précisé en 7.3.3.2.2, que l'apport de matières fertilisantes sources de cadmium (engrais minéraux phosphatés) est autorisé en agriculture biologique (AB). Ainsi, sauf à reconsidérer le cahier des charges de l'AB, celle-ci est potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium.

⁸¹ Exposition tenant compte de toutes les sources et voies d'exposition.

- Elle a permis de modéliser, à l'échelle de la population, l'accumulation vie-entière du cadmium en tenant compte de la dynamique d'évolution de l'exposition au cours de la vie, à partir de différentes sources et voies d'exposition retenues pour la population générale française (par l'alimentation, par inhalation, par contact cutané...).
- Pour cela, la modélisation tient compte des évolutions des expositions alimentaires au cours de la vie, à la fois par les évolutions des habitudes de consommation alimentaires et par les évolutions des contaminations en cadmium des aliments tels que consommés, mesurées dans les EAT conduites successivement en France.

Cette modélisation permet ainsi de mettre en évidence la contribution de différentes sources et voies – notamment alimentaires - pour l'ensemble de la population et en particulier pour les individus ayant des imprégnations simulées supérieures à la VTR interne.

En ce sens, une réflexion sur le développement d'une méthodologie spécifique pourrait être entreprise. Cette méthodologie viserait à fixer une teneur maximale tenant compte de la contribution de l'aliment à l'exposition alimentaire totale. Elle devrait également tenir compte de l'ensemble des autres sources d'exposition au cadmium. Le modèle méthodologique d'agrégation des sources et voies d'exposition, ainsi que de prédiction de la cadmiurie, mis en œuvre dans cette expertise, constitue à ce titre un support essentiel pour ce développement.

L'intérêt d'établir des teneurs limites en cadmium spécifiques à l'aliment sur une base sanitaire en fonction des meilleures données scientifiques disponibles a également été soulevé aux Etats-Unis, où il n'existe pas, actuellement, de TM en cadmium dans les aliments (Schaefer et al., 2020).

A l'échelle internationale, une évaluation des impacts de différentes limites maximales en cadmium sur les produits à base de cacao réalisée par le *Codex Alimentarius* conclut que certaines des limites proposées pourraient entraîner des taux de rejet substantiels (jusqu'à 30 %) pour les produits de certaines régions, qui s'accompagnerait d'un impact mineur sur l'exposition alimentaire totale au cadmium. Néanmoins, le GT n'a pas identifié d'analyse du *Codex* portant sur d'autres aliments contributeurs (FAO-WHO, 2021).

En vue de réduire l'imprégnation de la population au cadmium, **cette révision des teneurs maximales dans les aliments sur une base sanitaire fixerait ainsi l'objectif à respecter lors de l'importation de denrées alimentaires en Europe (et donc en France) d'une part et, au niveau agricole d'autre part, pour réduire les apports extérieurs de cadmium aux sols via les matières fertilisantes ainsi que son transfert dans les denrées** (cf. 7.3.2 et 7.3.3).

7.3.1.2 Information des consommateurs

Tel qu'évoqué dans le chapitre 6, à l'échelle de l'ensemble de la population française, le GT recommande de promouvoir une alimentation diversifiée, en variant les sources d'approvisionnement, afin de couvrir les besoins nutritionnels, et pour éviter l'éventuelle exposition répétée au cadmium en raison de la consommation régulière d'une denrée provenant d'une source d'approvisionnement unique (cf. 6.3.1.2).

De plus, **certaines personnes, notamment les forts consommateurs d'aliments les plus contaminés, peuvent être exposées à des niveaux plus élevés de cadmium.** En particulier, d'après les résultats de l'EAT3 (Anses, 2026), chez les adultes dont l'exposition

dépasse la DJT, la contribution des crustacés et des mollusques à l'exposition moyenne au cadmium s'élève de 15 à 20 % contre 4 % dans la population adulte totale.

Des TM en cadmium sont généralement appliquées aux aliments les plus contaminés, comme les abats ou les mollusques bivalves, mais ce n'est pas toujours le cas, comme pour certains mollusques gastéropodes tels que les bulots, dont le tortillon présente une teneur élevée en cadmium (Anses, 2020b), ou encore les algues (Anses, 2020a)⁸².

C'est pourquoi, le GT **recommande d'instaurer des teneurs maximales en cadmium pour les aliments contributeurs qui en sont dépourvus à ce jour (bulots, algues)**.

D'autre part, il recommande **d'informer les consommateurs sur les niveaux élevés de contamination de certaines denrées spécifiques susceptibles de conduire à une surexposition au cadmium en cas de consommation importante et/ou régulière**. Des actions d'information ont déjà été menées sur certains produits, au niveau national ou européen, mais pourraient être renforcées, en diversifiant les supports de communication pour améliorer la sensibilisation du public. Parmi les recommandations existantes figurent notamment celles de ne pas consommer le tortillon des bulots ou la chair brune du crabe (European Commission, 2011, Ministère de la santé et de la prévention, 2023).

Plus généralement, le GT **relève un besoin d'information du grand public sur les effets sur la santé du cadmium, les sources et voies d'exposition au cadmium, les moyens d'action à la source, etc.** Il considère pertinent de renforcer la diffusion d'informations scientifiques actualisées sur le cadmium en mobilisant différents canaux de communication : médias adaptés aux publics cibles, médecins généralistes, nutritionnistes, commerces, arrêtés / informations réglementaires sur les lieux de vente, fédérations de pêche.

7.3.2 Réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes

7.3.2.1 Repères pour l'analyse des options d'action sur les matières fertilisantes

L'**épandage de matières fertilisantes** sur les sols agricoles français (engrais, effluents d'élevage, boues de stations d'épuration...) peut **constituer une source importante de cadmium**. En effet, Belon et al. (2012) ont estimé la contribution moyenne aux apports en cadmium dans les sols français à **55% pour les engrais minéraux, 25% pour les effluents d'élevage, et 5% pour les boues et composts** (cf. 4.2.1). Ces matières fertilisantes peuvent représenter à elles seules plus de 80% des apports en cadmium dans les sols agricoles, bien supérieurs à ceux des dépôts atmosphériques (14%).

Or le GT rappelle que le cadmium est qualifié dans le règlement européen REACH comme substance très préoccupante⁸³ car (éco)toxique et persistante dans l'environnement : les apports extérieurs de cadmium, notamment par les matières fertilisantes, s'ajoutent au sol, sont en partie transférés aux végétaux, aux animaux d'élevage, dans les eaux, transférés à l'être humain essentiellement *via* son alimentation, puis en partie retournés aux sols sous diverses formes (parties végétales non-récoltées, effluents d'élevage, boues de STEP...),

⁸² A noter que les algues font actuellement l'objet de travaux à l'échelle européenne visant à fixer, le cas échéant, des teneurs maximales (TM) en éléments traces métalliques (ETM), y compris en cadmium.

⁸³ Substances of very high concern (SVHC)

pouvant entretenir un cycle de contamination environnementale croissante et à forte dispersion.

Ainsi, selon Sterckeman et al. (2018a, 2018b), **si les pratiques culturales actuelles perdurent, la concentration moyenne en cadmium dans les sols français cultivés en grandes cultures pourrait augmenter d'environ 15 % d'ici la fin du prochain siècle. Cette hausse se traduirait par une élévation équivalente de la teneur en cadmium dans les cultures, renforçant ainsi l'exposition chronique des populations humaines par l'alimentation.** Cette accumulation est principalement attribuée, selon les auteurs, aux apports liés aux engrais minéraux phosphatés, qui représentent dans l'étude environ 85 % des contributions en cadmium dans les sols, soit près du double des pertes estimées par lessivage et exportation par les récoltes. Ces prédictions pour les sols français contrastent avec des résultats précédents à l'échelle européenne (Smolders et Six, 2014), qui anticipent une diminution moyenne de 15 % de la concentration en cadmium dans les sols. Trois facteurs principaux expliquent cette divergence : (1) un niveau d'apport en phosphore plus élevé en France que dans la moyenne européenne⁸⁴, (2) une concentration en cadmium plus importante dans les engrais minéraux phosphatés utilisés en France⁸⁵, et (3) un taux de lessivage du cadmium plus faible dans les sols français, le taux estimé dans l'étude européenne étant probablement surestimé.

Sterckeman et al. (2018a) relèvent que le maintien des pratiques agricoles actuelles, supposant une fertilisation excessive en phosphore, conduirait à une augmentation du cadmium dans les sols comprise entre 1,6 % et 3,9 % après un siècle, même en appliquant le projet de réglementation européen qui, tel qu'évoqué dans le chapitre 6, vise à limiter progressivement la concentration en cadmium dans les engrais phosphatés (de 60 à 40, puis à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅).

Carne et al. (2021) aboutissent à des conclusions similaires à celles de Sterckeman et al. (2018 a et b) et concluent, en outre, que le maintien de la limite en cadmium en France pour les engrais minéraux phosphatés par la norme NF U 42-001-1 de 90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ associé à des pratiques agricoles actuelles exigeantes en engrais⁸⁶, conduit à une augmentation de 66 % de la teneur moyenne en cadmium dans les sols et les cultures pour le prochain siècle. Par ailleurs, les auteurs observent que la concentration de 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅, adoptée dans le règlement européen UE 2019/1009 pour les engrais minéraux phosphatés, ne permet pas d'inverser rapidement la tendance à l'accumulation du cadmium dans les sols et les denrées alimentaires. **Une hausse moyenne pouvant atteindre 35 % dans les sols et 36 % dans les cultures (grain de blé) est ainsi projetée à un horizon de 100 ans. De plus, les résultats montrent que le maintien de la concentration en cadmium normée dans les engrais minéraux phosphatés entraîne une augmentation dans le temps du pourcentage de la population (adultes et enfants) surexposée au cadmium par l'alimentation, pouvant conduire au bout de 99 ans à un tiers ou plus des enfants pour lesquels le risque sanitaire ne pourrait pas être exclu** (Carne et al., 2021).

⁸⁴ Sterckeman et al. (2018a) indiquent des taux moyens d'application de phosphates sur les cultures de blé et de pommes de terre en France de 53 kg de P₂O₅ et de 84 kg de P₂O₅, respectivement, contre 21 kg de P₂O₅ et 45 kg de P₂O₅, respectivement, au niveau européen.

⁸⁵ Sterckeman et al. (2018a) indiquent, sur la base de l'étude de Nziguheba et Smolders (2008) que la concentration en cadmium des engrais minéraux phosphatés en France (51 mg Cd /kg P₂O₅) est la deuxième plus élevée parmi les pays européens, au-dessus de la moyenne européenne (36 mg Cd /kg P₂O₅).

⁸⁶ A noter que l'évolution des pratiques agricoles, y compris en matière de choix de culture et de pratiques de fertilisation, renvoie à d'autres options d'action abordées en 7.3.3.

Dans les évaluations menées par Sterckeman et al. (2018a, 2018b) et Carne et al. (2021), **la réduction de la concentration en cadmium dans les sols reste difficilement perceptible au cours des deux premières décennies. Ce n'est qu'au-delà de cette période qu'une diminution devient visible, à condition que les apports en cadmium via les engrais minéraux phosphatés soient strictement réduits en dessous de 40 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ et tendent à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ ou ne dépassent pas un flux d'apport de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ par les intrants agricoles.**

Corroborant les conclusions de ces études et de synthèses récentes (McLaughlin et al. 2021, Suciu et al. 2022), le **GT recommande donc la mise en œuvre de deux voies d'action complémentaires : la réduction des apports en cadmium par les matières fertilisantes (objet de la présente section) et la promotion de pratiques agricoles limitant la contamination des sols et des denrées** (cf. 7.3.3).

Ces voies d'actions sont ici analysées au regard des recommandations de l'Anses (2019, 2021), notamment d'un flux d'apport de cadmium n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹an⁻¹ pour limiter l'accumulation de cadmium dans les sols et dans les denrées agricoles, ainsi que la hausse de l'exposition de la population par l'alimentation. Afin de respecter ce flux, l'Anses (2019) recommande :

- une limite en cadmium égale ou inférieure à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ dans les engrais minéraux phosphatés, pouvant être régulés à la source ;
- de tendre vers une concentration égale ou inférieure à 1 mg Cd kg⁻¹ de matière sèche (MS) dans les fertilisants d'origine organique.

L'atteinte de ces valeurs implique des changements de pratiques, d'où l'importance d'identifier à la fois les éventuels verrous (organisationnels, techniques, économiques...) **et aussi les leviers mobilisables.** C'est le sens de l'éclairage apporté dans les sections suivantes.

Les filières des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC), telles que définies dans l'article L255-1 du Code Rural, ont amplement été décrites dans un précédent avis de l'Anses (2018).

Il est présenté succinctement dans la section 7.3.2.2 la filière des **engrais minéraux phosphatés**, identifiés comme la première source anthropique d'apport en cadmium dans les sols agricoles français (Belon et al. 2012) et européens (Ballabio et al., 2024). Dans cette section, il est proposé un abaissement des limites en cadmium dans ces engrais en France, et sont présentées deux voies envisageables en vue d'appliquer ces nouvelles limites : le recours à des **sources d'approvisionnement** en phosphates à moindre concentration en cadmium et/ou le recours à des procédés de **décadmiation**.

Par ailleurs, d'autres intrants agricoles, selon leur origine, peuvent constituer une source d'apport en cadmium non négligeable à prendre en considération pour une réduction de l'exposition humaine et la préservation de la santé. Ainsi la pertinence d'abaisser les limites en cadmium dans les **amendements et engrais organiques** est exposée (7.3.2.3), puis les incitations possibles à la réduction de la concentration en cadmium dans les **matières fertilisantes d'origine résiduaire** (MAFOR) (effluents d'élevage, boues de STEP, cendres et biomasses) sont discutées (7.3.2.4).

7.3.2.2 Abaissement des limites en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés

7.3.2.2.1 *Etat de la situation actuelle*

Les engrais minéraux phosphatés ont pour principale fonction d'apporter du phosphore, élément nutritif majeur indispensable à la croissance des plantes cultivées. Certaines cultures ont des exigences en phosphore plus élevées, par exemple la betterave à sucre, la pomme de terre, le colza (COMIFER, 2019), qui se traduisent par des apports plus fréquents et conséquents afin de prévenir des carences et pertes de rendement.

Utilisant essentiellement la roche phosphatée comme matière première dans la plupart des cas, les engrais minéraux phosphatés peuvent se présenter sous différentes formes : phosphate naturel obtenu par broyage de la roche phosphatée, superphosphate (présentant des concentrations plus ou moins élevées en pentoxyde de phosphore (P_2O_5)), phosphate d'ammonium diammonique (DAP), phosphate d'ammonium monoammonique (MAP) ou engrais composés associant azote, phosphore ou potassium (NPK) (Anses, 2018d). Ces produits se distinguent par leur concentration en phosphore, leur finesse de mouture, leur solubilité...des critères mis en avant par les vendeurs pour répondre aux différents besoins des clients. Par exemple, sur un sol basique, l'agriculteur épandra des formes plus solubles de phosphore (FAO, 2004).

Il n'existe pas de gisements de phosphates naturels en France. La roche phosphatée ou les produits intermédiaires / finaux découlant de sa transformation sont importés pour fabriquer et/ou distribuer ces engrais sur le marché français (FranceAgriMer, 2024).

L'UNIFA indique qu'en 2024 ses adhérents ont produit 58,5% des engrais livrés en France (source : audition UNIFA). Les coopératives et entreprises de négoce en charge de la distribution des engrais aux agriculteurs ont également une prise directe sur le marché mondial des engrais minéraux phosphatés, et peuvent donc également s'approvisionner directement auprès de fournisseurs étrangers (FranceAgriMer, 2024). Parmi les produits élaborés, le MAP et DAP sont les formes d'engrais minéraux phosphatés les plus distribuées en France, suivis des superphosphates, puis des engrais composés NPK et superpotassiques (données UNIFA, FranceAgriMer, 2024).

Tel qu'indiqué dans le chapitre 4, la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés dépend du cadmium naturellement présent dans la roche phosphatée servant à leur fabrication. La concentration en cadmium de cette roche est toutefois très variable selon le type de roche et son origine géographique : la concentration moyenne est peu élevée ($<1-4 \text{ mg kg}^{-1}$) dans les roches ignées (p.ex. en Afrique du Sud ou en Russie), mais peut être beaucoup plus élevée ($<1-150 \text{ mg kg}^{-1}$) dans les roches sédimentaires (p.ex. au Maroc, aux Etats-Unis, en Tunisie, au Sénégal) (Roberts, 2014).

Actuellement, plusieurs voies de mise sur le marché peuvent être empruntées par les fabricants d'engrais minéraux phosphatés en France. La conformité au règlement (UE) 2019/1009⁸⁷ n'est pas obligatoire et la mise sur le marché d'un produit en conformité avec le droit national ou les règles générales de libre circulation du traité sur le fonctionnement de l'UE reste possible : dans ce cas, en France, une limite en cadmium de **90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅** s'applique, dans l'attente d'un nouveau décret encadrant l'innocuité et l'efficacité des MFSC

⁸⁷ Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE

en France. Pour qu'un produit obtienne le marquage CE, la limite de **60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅** figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 s'applique (cf. chapitre 6).

Aucune base de données officielles sur la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France n'a été identifiée par le GT (en date du 1^{er} septembre 2025).

Des valeurs sont toutefois relevées dans deux publications scientifiques (Nziguheba et Smolders, 2008 ; Verbeeck, Salaets et Smolders, 2020). Elles sont basées sur l'analyse d'échantillons (mélanges NPK, roche phosphatée, phosphates transformés) collectés auprès de divers acteurs (autorités locales, organismes de recherche / universitaires, industrie) situés dans plusieurs pays européens. La première et la seconde études incluent respectivement 18 et 36 échantillons d'engrais distribués en France.

Les résultats de ces deux études sont empreints d'incertitudes en raison du mode d'échantillonnage non-représentatif en qualité et en volume des produits distribués. A titre illustratif, ils indiquent que la concentration en cadmium des **produits échantillonnés** en France est, en moyenne ou pour la plupart des échantillons, **supérieure à la limite de 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ préconisée par l'Anses pour ne pas dépasser le flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ pour l'ensemble des matières fertilisantes** (Anses, 2019a, 2021).

7.3.2.2.2 Limite en cadmium recommandée dans les engrais minéraux phosphatés

- **Efficacité sanitaire d'une baisse de la concentration en cadmium dans les engrais**

Des **études françaises reposant sur des bilans de masse, ont permis de documenter les bénéfices sanitaires qu'aurait une limite en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés abaissée à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅**. En particulier, l'étude de Carne et al. (2021) montre que cette concentration dans les engrais permet, selon les pratiques agricoles lors de l'épandage, de respecter le flux maximal annuel de cadmium dans les sols agricoles inférieur ou égal à 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹. Ce flux est la limite d'apport dans le sol, quelle que soit la matière fertilisante épandue, à ne pas dépasser de façon à pouvoir diminuer la contamination des sols et des productions agricoles, ainsi que limiter l'exposition du consommateur. En effet, ce flux limite est la valeur qui entraînerait en l'espace d'un siècle une réduction moyenne du cadmium allant jusqu'à 17 % dans les sols agricoles français, 18 % dans les grains de blé, 14 % dans les pommes de terre et 21 % dans les lixiviats, considérant une dose d'apport phosphaté de 180 kg P₂O₅ ha⁻¹ an⁻¹ utilisé dans le cadre d'une rotation pomme de terre/ blé / blé, avec un temps d'impasse de 2 ans. **Ces travaux soulignent que la mise en œuvre d'options d'action appropriées, permettant de passer sous le seuil des 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹, est indispensable pour enrayer une évolution à la hausse du pourcentage de la population (adultes et enfants), dont l'exposition dépasse la valeur toxicologique de référence au cadmium par la seule voie alimentaire** (Anses, 2019a). Il est relevé que ces travaux ont porté sur des tests sur deux productions agricoles à l'origine d'aliments contributeurs majeurs à l'exposition alimentaire au cadmium de la population française (pommes de terre et blé). Cependant, les engrais minéraux phosphatés étant utilisés pour fertiliser d'autres cultures, il est vraisemblable que les bénéfices d'une action sur ces deux cultures s'étendent à d'autres et se répercutent sur les autres aliments du régime alimentaire total, et puissent contribuer à

la réduction des expositions alimentaires et de la part de la population à risque par l'alimentation.

De plus, les conclusions de Sterckeman et al. (2018 a & b) appuient le fait qu'une concentration abaissée à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ dans les engrais minéraux phosphatés, combinée à de bonnes pratiques de fertilisation phosphatée, permettrait de réduire la concentration en cadmium des sols de 3,0 % à 5,2 % après un siècle d'agriculture conventionnelle.

Dans ce contexte, **le GT réaffirme que l'emploi des engrais minéraux phosphatés distribués et utilisés en France, ne doit pas entraîner le dépassement d'un flux de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹. Une concentration en cadmium n'excédant pas 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ permet de s'assurer du respect de ce flux aux conditions d'emploi de l'engrais, ainsi que de la diminution dans le temps de la contamination en cadmium dans les sols agricoles et les denrées alimentaires. L'atteinte de cette valeur vise ainsi à diminuer la part de la population dépassant la valeur toxicologique de référence par ingestion, notamment des aliments forts contributeurs à l'exposition au cadmium (pommes de terre, céréales et légumes).**

Le GT indique qu'il n'est pas légitime (hors périmètre de ses attributions) pour proposer un calendrier d'entrée en application de cette limite, mais souligne toutefois que le plus tôt serait le mieux afin de réduire l'impact sanitaire du cadmium.

- **Changements de pratique pour abaisser la concentration en cadmium dans les engrais**

Cependant, les auditions réalisées indiquent clairement que dans la mesure où les engrais minéraux phosphatés respectent les limites fixées selon le cadre réglementaire aujourd'hui en vigueur, cela ne conduit pas les fabricants français de fertilisants à chercher à abaisser la concentration en cadmium dans leurs produits.

Sur le plan socio-économique, deux études, conduites au début des années 2000, avaient examiné **quelles seraient les conséquences d'un abaissement de la concentration limite en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés ou d'une taxe sur le cadmium dans ces engrais** (Oosterhuis et al., 2000, Cupit et al., 2002). Elles concluaient que de telles mesures pourraient entraîner **deux types de changements de pratiques chez les fabricants et distributeurs d'engrais**, avec des implications variables en termes de faisabilité et de coût selon la situation et les acteurs :

- Recourir à des sources d'approvisionnement en roches phosphatées ou produits dérivés présentant de moindres concentrations en cadmium ;**
- Recourir à des procédés de décadmiation lors de la fabrication des engrais minéraux phosphatés.**

Les résultats indiquaient qu'une nouvelle contrainte (limite abaissée ou taxe) se traduirait, à court ou moyen terme, par des approvisionnements en roches / produits à moindre concentration en cadmium, sous réserve de disponibilités suffisantes et que ceux-ci soient adaptés aux procédés de fabrication des importateurs.

Néanmoins, à moyen-long terme, les auteurs indiquaient que le recours à la décadmiation pourrait être un scénario privilégié, sous réserve de technologies opérationnelles et économiquement viables (cf. annexe 8).

Ces conclusions reposaient sur des hypothèses empreintes d'incertitudes et des données anciennes (élasticité-prix de l'offre et de la demande, tendances du marché, concentration en cadmium dans les produits, état d'avancement des technologies de décadmiation, etc.). Dans les sections suivantes, ces deux changements de pratiques seront mis en perspective à l'aune de données plus récentes et spécifiques au contexte français.

- **Instrument d'action à privilégier : baisse de la limite réglementaire plutôt que taxe**

Pour contraindre ou inciter à réduire la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, deux principaux instruments ont été identifiés dans la littérature : un abaissement de la limite réglementaire en cadmium ou une taxe sur le cadmium dans ces engrais.

Sur le plan réglementaire, le GT note que plusieurs pays européens appliquent, en maintenant ou en introduisant des dérogations nationales réglementaires, des limites inférieures à celle de 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ entrée en vigueur selon le règlement UE 2019/1009, notamment la Finlande (22 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅), la Hongrie et la Slovaquie (20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) la Suède (44 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) et le Danemark (48 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅). Cela témoigne d'une volonté politique renforcée de limiter les apports de cadmium aux sols agricoles. Il est remarqué par ailleurs que ce règlement laisse la possibilité à un État membre d'introduire de nouvelles dispositions nationales limitant la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, sur la base des preuves scientifiques qui le justifient. A la différence de mesures incitatives ou volontaires, un abaissement de la limite réglementaire en cadmium dans les engrais présente l'avantage de s'appliquer uniformément et systématiquement à tous les produits et acteurs concernés. Elle offre ainsi davantage de prévisibilité pour les fabricants et de certitude quant à la réduction de la concentration en cadmium dans les sols. Cela facilite également l'évaluation de l'efficacité de ce levier d'action.

Concernant la taxation du cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, seul le cas de la Suède a été identifié. Une taxe y est entrée en application en 1994, à hauteur de 30 SEK (~3€) / g de cadmium au-delà du niveau de 5 grammes de cadmium par tonne de phosphore dans les engrais minéraux phosphatés, soit environ 5% de leur prix en cas de transmission complète de la taxe. D'après une étude de la Swedish Chemical Agency (KEMI) basée sur l'élasticité de la demande au prix des engrais, cette taxe n'aurait entraîné qu'une réduction de l'utilisation des engrais phosphatés que de 1 à 2%. En s'appuyant sur une modélisation sur 20 ans, les auteurs indiquent par ailleurs que la réduction de l'accumulation en cadmium dans les sols liée à la moindre utilisation des engrais phosphatés était limitée, malgré une réduction de la concentration en cadmium dans les engrais (Drake et Hellstrand 1998). Cette taxe a été abolie en 2009, dans un contexte de crise financière (Andersen, 2022). Par ailleurs, à l'échelle européenne, sans lien explicite avec la problématique du cadmium, le règlement d'exécution (UE) 2016/1821 du 6 octobre 2016 relatif à la nomenclature tarifaire et statistique et au tarif douanier commun prévoit l'application de droits conventionnels de 4,8% pour l'importation de superphosphates depuis des pays extérieurs à l'UE. Néanmoins, il existe des préférences tarifaires ramenant ces droits à 0% pour les importations en provenance de divers pays, incluant ceux d'où proviennent fréquemment les engrais minéraux phosphatés commercialisés

en France (ex. Maroc)⁸⁸. Enfin, diverses expériences de taxation des engrais azotés ont été identifiées dans cinq pays européens (Autriche, Finlande, Norvège, Suède, Pays-Bas). Plusieurs ont été abandonnées au moment de l'entrée du pays dans l'UE pour réduire les distorsions fiscales. Des analyses socio-économiques indiquent une efficacité limitée de ces instruments sur l'utilisation d'engrais, et/ou un coût de gestion élevé en termes d'organisation et de collecte d'informations (Bel et al., 2004 ; Marcus et Simon, 2015).

Il ressort de ces quelques éléments que l'efficacité d'une taxe impliquerait notamment qu'elle soit suffisamment élevée pour réellement inciter les producteurs d'engrais à réduire la concentration en cadmium, qu'elle cible des produits à plus forte concentration en cadmium et se répercute sur le prix de vente, que des alternatives moins riches en cadmium soient disponibles sur le marché, soient moins taxées, moins coûteuses, et attractives pour les acheteurs. Ce type d'instrument soulève donc divers enjeux (faisabilité technique, impacts sur les pratiques des fabricants et des utilisateurs finaux, coûts administratifs...) qu'il conviendrait d'étudier plus précisément pour apprécier la pertinence d'une taxe dans le contexte actuel.

En l'état des connaissances, le GT recommande donc de **privilégier une baisse de la limite réglementaire en cadmium (plutôt qu'un instrument fiscal), compte tenu de son efficacité et de la prévisibilité de ses implications, de telle sorte que le flux maximal de 2g Cd ha⁻¹ an⁻¹ de cadmium apporté aux sols agricoles ne soit pas dépassé. Cette limite devrait être la même, quelle que soit la voie de mise sur le marché d'engrais minéraux phosphatés (fabriqués ou importés), afin de réduire la concentration en cadmium dans les produits commercialisés en France, et ainsi réduire plus efficacement l'accumulation de cadmium dans les sols.**

En lien avec un tel abaissement de la limite réglementaire, le GT souligne la pertinence d'une révision de l'étiquetage des engrais sur le cadmium. Tel qu'évoqué dans le chapitre 6, la réglementation de l'étiquetage dépend de la voie de mise sur le marché. Le règlement UE 2019/1009 prévoit la possibilité d'utiliser l'allégation « faible teneur en cadmium » lorsqu'un engrais organo-minéral a une concentration en cadmium égale ou inférieure à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅. Une représentation visuelle à cet effet peut être ajoutée. Cela est donc possible, en France, si le produit est mis sur le marché sous marquage CE. Si tel n'est pas le cas, la réglementation française de l'étiquetage (décret du Ministère de l'économie n°80-478 du 16 juin 1980) ne prévoit pas, actuellement, l'indication des concentrations en cadmium sur l'étiquette des matières fertilisantes ni de mention « faible teneur en cadmium ». **Il serait donc pertinent que les modalités d'étiquetage des matières fertilisantes soient réglementées de telle sorte que les utilisateurs puissent facilement identifier les produits à plus faible concentration en cadmium (voir aussi 7.3.3.2.3), ainsi qu'à des fins de surveillance et de contrôle des produits.**

Un éclairage sur les changements de pratique qu'impliquerait une telle baisse de la limite réglementaire en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, que ce soit en changeant de source d'approvisionnement ou en ayant recours à la décadmiation, est apporté dans les deux sections suivantes.

⁸⁸ D'après les consultations du Référentiel Intégré Tarifaire Automatisé (RITA) de la Direction Générale des Douanes et de Droits Indirects (2/4/25) et de la base de données du Tarif Douanier (TARIC) de l'UE (2/4/25). A l'exception des superphosphates, de tels droits d'importation ne s'appliquent pas sur les autres types d'engrais minéraux ou chimiques phosphatés.

7.3.2.2.3 Approvisionnement en produits phosphatés à moindre concentration en cadmium

- **Eclairage sur le contexte français**

Le **Tableau 25** décrit la nature et la provenance des importations de roches phosphatées, produits intermédiaires et engrais minéraux phosphatés en France (2023 et 2024), à partir des statistiques douanières⁸⁹. Cet état des lieux permet de constater :

- une importation de produits bruts (roches phosphatées), intermédiaires (acides phosphoriques) mais également finis (superphosphates, MAP, DAP) reflétant à la fois les activités de fabrication et de distribution d'engrais minéraux phosphatés à l'échelle nationale⁹⁰ ;
- des importations essentiellement en provenance d'hors UE, mais aussi parfois intra-UE (provenance initiale non renseignée), issues de plusieurs pays ;
- une importation de roches phosphatées et acides phosphoriques très largement en provenance de pays d'Afrique du Nord (Maroc, Egypte et Algérie), où les gisements de roches phosphatées sont connus comme étant constitués de roches sédimentaires (Kubier et al., 2019 ; Oosterhuis et al., 2000) ;
- une importation d'engrais minéraux phosphatés (superphosphates, MAP, DAP) provenant majoritairement d'Afrique du Nord, mais aussi de Russie (DAP)⁹¹ où les gisements sont connus comme étant constitués de roche ignée.

Il est à rappeler (cf. chapitre 4) que la concentration moyenne en cadmium mesurée dans des échantillons de roches phosphatées ignées apparaît systématiquement faible, mais c'est aussi le cas pour certains échantillons de roches sédimentaires (Roberts, 2014 ; Nino-Savala, 2019).

Ces informations indiquent une **diversité de voies d'approvisionnement possibles en engrais minéraux phosphatés, incluant en principe des produits dont la concentration en cadmium est inférieure à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅**.

Toutefois, **l'absence de données plus précises sur les concentrations en cadmium des matières fertilisantes importées en France et des produits disponibles sur le marché actuellement ou à l'avenir** (issus de réserves / projets d'exploration) **limite, dans le cadre de cette auto-saisine, l'étude de scénarios de substitution** vers un approvisionnement en produits à plus faible concentration en cadmium, que ce soit en provenance des pays actuellement fournisseurs, ou d'autres.

Par ailleurs, dans la mesure où la France est totalement dépendante de ses importations en roches et engrais minéraux phosphatés, l'étude de tels scénarios ne peut se faire qu'en tenant compte du contexte international.

⁸⁹ Statistiques du portail Le Chiffre du Commerce extérieur : https://lekiosque.finances.gouv.fr/portail_default.asp

⁹⁰ Les volumes exportés des mêmes catégories de produits sont relativement peu élevés, indiquant une transformation des volumes importés et une distribution essentiellement sur le marché français. Selon FranceAgriMer (2024), les exportations françaises totales d'engrais phosphatés restaient faibles sur la période 2010-2020 avec des volumes avoisinant 20 kt destinés majoritairement à l'Espagne.

⁹¹ Ce constat converge avec l'analyse réalisée par FranceAgriMer (2024) selon laquelle les importations extra UE de roches ou engrais phosphatés représentent en moyenne les deux tiers des volumes totaux importés, principalement du Maroc et dans une moindre mesure de Russie.

Tableau 25. Nature et provenance des importations françaises de roches phosphatées, produits intermédiaires et engrais minéraux phosphatés en France en 2023-24

Produit (code NC8)	Volumes importés en 2023 (tonne)	Volumes importés en 2024 (tonne)	Valeurs importées en 2024 (k€)	Principaux pays d'origine (Volumes 2024)
Roches phosphatées				
Phosphates de calcium et phosphates aluminocalciques, naturels et craies phosphatées, non moulus (25101000)	67 107	64 995	9 123 (140,4 €/t)	Egypte : 54,3% Algérie : 38,4% Tunisie : 6,4%
Phosphates de calcium et phosphates aluminocalciques, naturels, et craies phosphatées, moulus (25102000)	50 111	61 659	9 205 (149,3 €/t)	Maroc : 40,1% Algérie : 36,4% Belgique : 4,8%
Produits intermédiaires				
Acide phosphorique ; acides polyphosphoriques, de constitution chimique définie ou non (28092000)	196 250 111 726*	208 687 118 509*	157 234 (753,4 €/t)	Maroc : 44,7% Belgique : 30,9% Israël : 9,3%
Engrais minéraux phosphatés (hors engrais composés et superpotassiques)**				
Superphosphates contenant, en poids, ≥ 35 % P ₂ O ₅ (31031100)	176 997 77 091*	221 824 88 223*	91 016 (410,3 €/t)	Maroc : 38,4% Israël : 27,6% Egypte : 12,0%
Superphosphates (à l'exclusion des produits contenant, en poids ≥ 35 % P ₂ O ₅) (31031900)	78 420 25 324*	48 367 15 173*	11 265 (232,9 €/t)	Pays-Bas : 32,6% Espagne : 21,2% Allemagne : 14,1%
Engrais minéraux ou chimiques phosphatés (à l'excl. des superphosphates) (31039000)	12 525 7211*	12 499 4283*	4880 (390,4 €/t)	Egypte : 92,4% Espagne : 6,3%
Phosphate monoammonique (seul ou mélange avec phosphate diammonique) (31054000)	42 025	40061	26 111 (651,8 €/t)	Maroc : 43,7% Egypte : 15,1% Lituanie : 12,4%
Phosphate diammonique (31053000)	302 094	334 670	189 292 (565,6 €/t)	Maroc : 41,8% Russie : 30,0% Lituanie : 9,7% Belgique : 9,4%

Source : statistiques extraites du portail Le Chiffre du Commerce extérieur (https://lekiosque.finances.gouv.fr/portail_default.asp), Direction générale des douanes et droits indirects, consulté en juillet 2025. * kg P₂O₅ (pentaoxyde de diphosphore)

** Principaux types d'engrais consommés pris en compte. Selon FranceAgriMer (2024) les DAP/MAP est la principale forme utilisée en France (29% des volumes équivalent P₂O₅ consommés en moyenne entre 2010 et 2021), devant les superphosphates à +/- 35% (21%), les engrais composés NPK (16%), et les superpotassiques (15%).

- **Eclairage sur le contexte international**

A cet égard, des analyses du marché des engrais minéraux phosphatés à l'échelle internationale et en France, ainsi que les auditions réalisées, permettent de soulever différents points d'attention :

- A l'échelle internationale, en 2024, les principaux producteurs de roche phosphatée étaient la Chine (110 Mt), le Maroc (30 Mt), les Etats-Unis (20 Mt) et la Russie (14 Mt). Le Maroc dispose de la plus grande réserve identifiée (50 000 Mt), loin devant la Chine (3 700 Mt). Dans l'UE, seule la Finlande est actuellement productrice (0,9 Mt), et détient également une réserve de roche ignée (1 000 Mt) (US Geological Survey, 2025).
- L'UE est presque entièrement dépendante des importations de roches phosphatées, ce qui l'expose aux variations d'offre et de prix sur le marché. Les principaux volumes importés proviennent de Russie, puis du Maroc. Seule la Finlande produit et fournit de la roche phosphatée sur le marché intérieur (Hague Centre for Strategic Studies, 2012). En 2023, la France était le premier importateur d'engrais en équivalents phosphate (17%) suivi de l'Italie (14%) et de l'Espagne (11%) (FranceAgriMer, 2024).
- Un important gisement de roche phosphatée a récemment été découvert en Norvège, mais n'est actuellement pas exploité⁹². Selon la société en charge de l'exploration, il s'agit de roche ignée, à très faible concentration en cadmium⁹³.
- D'après les auditions réalisées, en France, les variations de prix des produits sur le marché mondial de la roche / des engrais phosphatés influencent les choix des importateurs (quantité, origine des approvisionnements). Les coûts d'acheminement sont également à prendre en considération.
- Les prix sont sensibles à une diversité de facteurs : stratégie des producteurs, instabilité géopolitique / guerres dans certaines régions, prix de l'énergie, accès à l'eau etc. (Hague Centre for Strategic Studies, 2012). Par exemple, dans le contexte de la guerre en Ukraine, la Chine a rehaussé en 2023 ses droits à l'exportation des engrais pour favoriser son marché intérieur, ce qui a affecté l'approvisionnement mondial (FranceAgriMer, 2024). Plus récemment, le Parlement européen a augmenté les droits de douane sur divers produits agricoles, dont les engrais, en provenance de Russie et Biélorussie, afin de réduire la dépendance de l'UE à l'égard de ces deux pays⁹⁴.
- D'après le Hague Centre for Strategic Studies (2012), la dépendance de l'UE aux importations de phosphates en provenance du Maroc devrait relativement augmenter à l'avenir. Par ailleurs, l'industrie du phosphate naturel tend à s'intégrer verticalement, les sociétés minières produisant de plus en plus d'engrais, d'acide phosphorique et autres dérivés de la roche. Ainsi les importations dans l'UE prennent de plus en plus souvent la forme d'engrais minéraux phosphatés, plutôt que de phosphate naturel brut.
- Pour contribuer à réduire la dépendance de l'UE aux importations de roches/engrais minéraux phosphatés, le Hague Centre for Strategic Studies (2012) souligne l'intérêt de stratégies d'action permettant un meilleur usage et recyclage du phosphore sur le

⁹² [L'UE salue la découverte d'un énorme gisement de phosphate en Norvège - Euractiv FR](#)

⁹³ <https://www.ion3.org/resource/what-lies-beneath.html>

⁹⁴ [De nouveaux droits de douane sur les produits agricoles russes et biélorusses | Actualité | Parlement européen](#)

territoire (amélioration des pratiques de fertilisation, utilisation de matières phosphatées d'origine organique), tel que cela est engagé dans plusieurs pays. Le GT indique toutefois que le recours aux différentes MAFOR doit faire l'objet d'une vigilance particulière : elles contiennent le plus souvent plusieurs contaminants, dont le cadmium (cf. 7.3.2.4).

- **Conclusion : un moyen d'action pertinent en complément de la décadmiation**

L'ensemble des éléments présentés indiquent qu'une **évolution vers des approvisionnements en roche / engrais phosphatés à faible concentration en cadmium pourrait contribuer au respect d'une concentration limite abaissée en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France.**

Toutefois, l'ampleur et la nature des substitutions que cela impliquerait (produits, fournisseurs, pays d'origine) ainsi que les conditions associées sont difficiles à estimer compte tenu des données disponibles. En effet, cette évolution s'inscrirait dans le cadre d'un marché mondialisé, sur lequel l'accès aux roches/engrais à plus faible concentration en cadmium est conditionné à divers facteurs : ressources et stratégies des fournisseurs de produits à plus faible concentration en cadmium, accords commerciaux ou de collaboration avec les pays producteurs, situation géopolitique, contraintes économiques et techniques des fabricants et importateurs...

Une analyse du marché incluant les différentes sources d'approvisionnement envisageables et la concentration en cadmium des roches phosphatées pourrait éclairer précisément la mise en œuvre de cette voie de réduction de la concentration en cadmium des engrais minéraux phosphatés commercialisés en France.

En l'état des connaissances présentées, pour réduire la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, le GT considère donc **incontournable d'envisager une voie complémentaire : la décadmiation**, qui pourrait assurer une réduction à la source du cadmium pour tous les usagers à un coût raisonnable pour les industriels (cf. sous-section suivante).

7.3.2.2.4 Recours à des procédés de décadmiation

- **Importance d'un prérequis réglementaire**

Le recours possible, à moyen et long termes, à des procédés de décadmiation pour améliorer la qualité des engrais phosphatés issus de roche naturelle, a été souligné il y a plus de vingt ans par Oosterhuis et al. (2000) et Cupit et al. (2002), sous réserve que les conditions du marché soient réunies, et également que les investissements technologiques requis soient réalisés.

En effet, la décadmiation consiste à **abaisser la concentration en cadmium des engrais minéraux phosphatés, notamment par des traitements chimiques et/ou physiques, pour répondre aux exigences de protection des consommateurs.** Le recours à ce type de technologies a donné lieu, dès les années 90, à des projets de brevet proposant par exemple

un procédé de décadmiation de l'acide phosphorique, intermédiaire lors de la fabrication par voie humide des engrais minéraux phosphatés, et permettant un rendement de décadmiation de l'ordre de 90% (CERPHOS, 1993).

En 2021, l'Anses, en appuyant ses recommandations sur les limites abaissées en cadmium dans les matières fertilisantes indiquait, pour les engrais minéraux phosphatés, que les procédés de décadmiation existants méritaient d'être développés et mis en œuvre, dans le cadre d'une politique active de réduction des apports en cadmium.

La réglementation est un levier indispensable pour prendre en compte l'(éco)toxicité du cadmium en agriculture et contraindre les acteurs du marché (fabricants, importateurs, distributeurs) à intégrer la décadmiation dans leurs procédés de fabrication sur des bases de connaissances partagées, et dans l'intérêt commun.

Le Règlement UE 2019/1009 relatif à la mise à disposition sur le marché des fertilisants, aussi dit « REACH Fertiliser » (FranceAgriMer, 2024), apporte des **dispositions en ce sens**, qui mériteraient d'être activement déployées.

En effet, il instaure un principe de concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés progressivement abaissées au cours du temps : la concentration maximale actuelle est de 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ avec un objectif futur de réduction possible à 40 mg, voire 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅. Ces dispositions ont plusieurs conséquences réglementaires :

- Obligation de conformité pour vendre les engrais sur le marché européen.
- Incitation à investir dans des technologies de décadmiation.
- Possibilité d'utiliser l'allégation « faible teneur en Cd » (engrais organo-minéral dont la concentration en cadmium est égale ou inférieure à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅)
- Responsabilisation des vendeurs et importateurs.

En ce sens, le GT souligne que la recommandation de l'Anses, sur une base sanitaire, d'abaisser la limite en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ constituerait un levier réglementaire pour inciter les acteurs de la filière à développer et mettre en œuvre des procédés de décadmiation.

Les travaux du GT ont permis de constater que les connaissances sur ce sujet, qui relèvent essentiellement d'acteurs économiques, sont limitées dans la littérature scientifique. Néanmoins, plusieurs études, rapports et les auditions réalisées permettent d'apporter un éclairage sur les impacts et la faisabilité de ces procédés.

• Faisabilité technique : des procédés existants

Tout au long de la fabrication de l'engrais minéral phosphaté, la concentration en cadmium peut varier à chaque étape du procédé, de l'extraction du phosphate brut au produit final en passant par les produits intermédiaires.

Dresser un panorama des procédés de décadmiation avec l'ambition de les comparer au plan de leur maturité technique et de leur faisabilité économique est un exercice difficile. En effet, les références qui traitent du sujet émanent souvent d'industriels et établissements de recherche, en tout ou partie financés par les professionnels du secteur. Elles seront donc considérées dans un second temps.

Le GT a identifié une étude publiée par la Commission Européenne (2016), portant sur la problématique du cadmium dans les fertilisants. La décadmiation est évaluée en tant que

solution possible, et deux procédés sont retenus car considérés comme les plus prometteurs, tous deux applicables à la voie de production des fertilisants passant par l'acide phosphorique, seulement (alors qu'il existe d'autres voies de production des fertilisants).

Le procédé CERPHOS (Centre d'Etudes et de Recherches des Phosphates Minéraux, devenu « OCP-Nextservices », filiale de l'OCP) est qualifié de « semi-industriel ». Après attaque de la roche phosphatée ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) par de l'acide sulfurique, l'acide phosphorique est produit, comportant du cadmium, entre autres éléments. Le procédé consiste à provoquer une cristallisation du sulfate de calcium au cours de laquelle le cadmium co-cristallise avec le calcium.

Le procédé ELICAD est basé sur un mécanisme d'adsorption : le cadmium en solution dans l'acide phosphorique se fixe alors sur du charbon actif. Pour ce procédé, le surcoût correspondrait à une augmentation de 2 à 6% du prix des fertilisants.

Des brevets existent pour ces deux procédés et le stade « pilote de laboratoire », acquis, atteste d'une maturité technique avancée. Toutefois, l'étape de « pilote industriel » reste à franchir avant d'envisager un déploiement opérationnel.

Les deux procédés sont proches en matière de coût de fonctionnement (30 US\$ par tonne de P_2O_5 produite pour CERPHOS ; 12 à 32 € par tonne de P_2O_5 pour ELICAD), mais les investissements sont sensiblement plus faibles pour le procédé ELICAD (Commission Européenne, 2016).

En complément de cette étude, une bibliographie abondante fait état d'une multitude de procédés, intéressants à présenter, mais qu'il est difficile d'utiliser à des fins de comparaison, comme les auteurs présentent des liens d'intérêt manifestes : les informations qu'ils rapportent sont à considérer avec circonspection.

Samrane (2023) évoque en premier lieu une décadmiation basée sur une calcination du minerai brut, nécessitant beaucoup d'énergie, et conduisant à une libération de cadmium sous forme vapeur. Les autres procédés s'appliquent non pas sur le minerai mais sur l'acide phosphorique résultant de l'attaque du minerai par de l'acide sulfurique. Ce sont les procédés « par voie humide » (Samrane et al., 2023) :

- La précipitation du cadmium sous forme de sulfure minéral ou organique
- La précipitation du cadmium avec divers ligands organiques (dithiophosphinates, organophosphorés)
- L'adsorption sur des matériaux naturels (lignine, argile, charbon actif...) ou synthétiques (polymères divers) ; principe utilisé dans le procédé ELICAD.
- L'extraction liquide-liquide (alcools, éthers...)
- L'échange ionique (résines Duolite, Diphonix, Amberlite XAD...)
- L'électrodéposition
- La co-cristallisation avec le sulfate de calcium ; principe utilisé dans le procédé CERPHOS.

Pour chacun des procédés cités, il existe une multitude de variantes possibles, documentées scientifiquement. Ces procédés et leurs dérivés n'ont pas les mêmes degrés de maturité technologique : à la suite des deux plus avancés identifiés par la Commission Européenne (2016) existe un ensemble de procédés déjà brevetés, d'autres non. Dans tous les cas, ces procédés ne semblent pas avoir atteint le stade de pilote de laboratoire, encore moins celui du stade pilote industriel. Enfin, une maturité technologique avancée devrait idéalement intégrer

la démonstration d'une maîtrise des sous-produits et déchets cadmiés occasionnés, et rien ne semble proposé en la matière.

- *Faisabilité économique : un coût maîtrisable et des bénéfices à long terme*

A l'heure actuelle, le GT n'a pas identifié d'informations attestant de la mise en pratique de la décadmiation à l'échelle industrielle.

D'après l'étude de la Commission Européenne susmentionnée (2016), **le surcoût de la décadmiation est généralement estimé entre 10 et 30 € / tonne eq. P₂O₅ d'engrais fini**, pour les deux procédés spécifiquement étudiés dans ce travail (CERPHOS, ELICAD). L'impact sur le prix final apparaîtrait donc limité et supportable par les industriels (comparé à la volatilité du marché des engrais). Par exemple, un engrais phosphaté coûtant 600 €/tonne P₂O₅ supporterait un surcoût **de l'ordre de 1,5% à 5%** pour être décadmié. Il convient également de tenir compte du coût d'investissement demandé.

D'une manière plus générale, Davister a proposé en 1994 une évaluation économique de 4 familles de procédés (**Tableau 26**). Il apparaît alors que la co-cristallisation se distingue des 3 autres procédés considérés, notamment pour les coûts de fonctionnement. Bien entendu, ces évaluations mériteraient d'être actualisées⁹⁵.

Tableau 26. Coûts en investissement et fonctionnement pour 4 familles de procédés de décadmiation de l'acide phosphorique, pour une unité de production d'une capacité de 500 tonnes P₂O₅/jour (d'après Davister, 1994)

Procédé	Conditions		Investissement (millions de US\$)	Coût de fonctionnement (US\$ / t de P ₂ O ₅)
Co-cristallisation	Sans traitement des déchets	Sans valorisation	3,30	8,65
		Avec valorisation		5,65
	Avec traitement des déchets	Sans valorisation	4,35	10,10
		Avec valorisation		5,65
Précipitation avec les sulfures			4,25	20,00
Echange ionique			6,20	25,00
Extraction liquide- liquide			6,30	27,00

Bien que non-quantifiées dans les études mentionnées, d'autres implications sont à signaler. Il s'agit d'une part **de contreparties économiques positives** à la décadmiation :

- pour l'ensemble des acteurs :
 - une réduction des risques juridiques et des coûts liés à la pollution des sols (cf. 7.3.4.2) ;
 - une contribution à la réduction des apports extérieurs de cadmium dans les sols ; agricoles, à son transfert dans les denrées et à l'exposition des consommateurs,
- pour les fabricants et distributeurs d'engrais :

⁹⁵ Des études plus récentes sur le sujet ont été identifiées, mais les auteurs citent également les travaux présentés par Davister dans les années 1990, sans mise à jour explicite des estimations (Samrane, 2023 ; Kouzbou et al., 2019). La communication originale de Davister sur le sujet qui a pu être consultée est donc plutôt citée ici.

- la possibilité, pour les engrais fabriqués par « voie humide », de se conformer aux limites réglementaires en vigueur dans l'UE et ainsi d'accéder au marché européen ;
- un effet économique d'échelle à moyen-long terme : les investissements initiaux deviendraient rentables avec la généralisation de la décadmiation.

D'autre part, la décadmiation s'accompagne **d'enjeux stratégiques à anticiper** :

- une pression croissante des acteurs en aval de la chaîne (coopératives, distributeurs, GMS, filières export), dans un contexte réglementaire sur le cadmium en évolution ;
- une pression également alimentée par le coût des externalités négatives potentiellement associées à la présence de cadmium dans les sols où sont utilisés les engrais (restrictions d'usage, dépollution future beaucoup plus coûteuse que la prévention actuelle).

Enfin, pour les pays producteurs d'engrais minéraux phosphatés, la décadmiation génère un **sous-produit contenant du cadmium** qui doit être traité de manière adéquate sur les sites de production pour ne pas générer de pollution. La nature et la quantité de ce sous-produit dépendent du processus de décadmiation utilisé (Oosterhuis et al., 2000, Cupit et al., 2002).

• Eclairage sur la situation française

D'une part, tel qu'indiqué en 7.2.3.1, les MAP / DAP et les superphosphates sont les formes d'engrais minéraux phosphatés les plus distribués en France (FranceAgriMer, 2024), ces produits étant fabriqués à partir d'acide phosphorique par « voie humide »⁹⁶. En l'état actuel des usages, cela indique qu'une part importante des engrais distribués en France sont fabriqués *via* un procédé compatible avec une technologie de décadmiation.

D'autre part, les fabricants et distributeurs français d'engrais minéraux phosphatés importent à la fois de la roche phosphatée, des produits intermédiaires et des produits finis. Par conséquent, la décadmiation est susceptible d'être utilisée à la fois par les fabricants français (à partir de roche phosphatée ou d'acide phosphorique) et par leurs fournisseurs de superphosphate triple, MAP/DAP, là où ils sont fabriqués.

En ce qui concerne la France, les auditions réalisées n'ont pas permis de savoir si les fabricants utilisaient déjà (ou non) des technologies de décadmiation. Néanmoins, récemment, lors des 16^{èmes} rencontres du COMIFER-GEMAS, a été communiquée l'existence d'une technologie « DAHF » à double cristallisation (dihydrate, puis conversion en hémihydrate) permettant de réduire la concentration en cadmium dans l'acide phosphorique fabriqué, de 80 à 7 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅, en comparaison à un procédé dihydrate standard. Cette technologie est présentée comme une solution pour bénéficier d'un « label bas cadmium » et respecter à terme une limite réglementaire abaissée à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ (Wavreille et Van Massenhove, 2023). En revanche, les coûts associés n'ont pas été communiqués. En supposant une augmentation maximale du prix de l'engrais phosphatée due à la décadmiation de 100 € par tonne P₂O₅ (une estimation haute, au vu des données précédemment présentées), Sterckeman et al. (2018) estiment que cela augmenterait en France le coût de la fertilisation phosphatée pour le blé (20 kg P₂O₅ ha⁻¹) de 2,0 € par ha. Cette augmentation représenterait environ 0,1 % du coût de production du blé (1 640 € ha⁻¹ en 2014).

⁹⁶ Pour les superphosphates, le triple superphosphate (TSP) uniquement

- **Conclusion : une option efficiente et durable**

Dans le contexte d'un abaissement recommandé de la concentration limite en cadmium à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅, **la décadmiation des engrais minéraux phosphatés n'est plus seulement un choix technique, mais un impératif environnemental et sanitaire face aux évolutions réglementaires (cf Tableau 27)**. Sous peine de se voir exclus de certains marchés à l'avenir, anticiper et intégrer la décadmiation dans leur offre, apparaît une option importante pour les producteurs d'engrais.

Tableau 27. Analyse et perspectives relatifs à la décadmiation des engrais minéraux phosphatés selon différentes dimensions technique, économique et stratégique

Dimension	Analyse	Perspectives
Technique	Procédés diversifiés, maturités technologiques variées	Nécessité d'adaptation des unités
Économique	Surcoût limité et absorbable ; traitement des déchets cadmiés à prendre en compte	Bénéfices en termes d'image et d'accès au marché
Stratégique	Pression réglementaire et sociétale	Décadmiation devenant un standard attendu

7.3.2.3 Abaissement des limites en cadmium dans les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture

7.3.2.3.1 *Etat de la situation actuelle*

La contribution relative des matières organiques aux apports de phosphore aux sols agricoles français a eu tendance à augmenter ces dernières années. Cela s'inscrit dans un contexte de diminution des apports en phosphore d'origine minérale et de progression des usages d'intrants organiques, à la croisée de plusieurs facteurs (Guejjoud et al., 2024 ; FranceAgriMer, 2024 ; Agreste, 2024) :

- une moindre prise en compte du phosphore comme élément limitant pour optimiser les rendements agricoles ;
- l'évolution de la Politique Agricole Commune, dont les subventions ont, non plus été liées au volume de production, mais plutôt à la superficie cultivée et à la taille des troupeaux ;
- la mise en œuvre de mesures agro-environnementales, favorisant une utilisation plus rationnelle des engrais inorganiques ;
- des périodes d'inflation à l'échelle internationale touchant fortement le marché des engrais minéraux, notamment récemment le déclenchement de la guerre en Ukraine.

Ainsi, une diversité d'engrais organiques et organo-minéraux, amendements, supports de culture, biostimulants⁹⁷ sont utilisés en agriculture. L'Afaïa⁹⁸, syndicat représentant la plupart des entreprises de ce secteur en France, décompose le circuit de ce type de matières fertilisantes en 6 étapes : 1) recherche et développement ; 2) collecte des matières organiques (végétale et/ou animale, en France ou dans les pays limitrophes) ; 3) transport vers une usine de fertilisants organiques, pour traitement et valorisation ; 4) fabrication des produits (avec ajout possible d'autres matières premières) ; 5) conditionnement et distribution (sous forme solide ou liquide, dans différents contenants) ; 6) utilisation en production végétale (Source : audition).

Selon l'Afaïa, pour la plupart des produits inclus dans son périmètre, l'approvisionnement en matières premières se fait généralement en France ou dans les pays limitrophes, selon un principe d'économie circulaire. Le syndicat regroupe une diversité de produits et donc de cultures cibles. Par exemple, les produits plus élaborés, à plus forte valeur ajoutée, vont avoir tendance à être davantage utilisés en cultures de spécialité (viticulture, maraîchage, arboriculture...), tandis que d'autres produits à base d'effluents d'élevage, composts et assimilés vont davantage être distribués localement (30/40 km) à destination des grandes cultures (Source : audition).

Aucune base officielle de données représentatives de la concentration en cadmium dans les amendements et engrais organiques / organo-minéraux et biostimulants commercialisés en France n'a été identifiée par le GT.

Des plans de contrôles sur les matières fertilisantes et supports de culture sont régulièrement mis en œuvre par la DGCCRF. De façon générale, ils signalent l'existence d'anomalies persistantes, y compris concernant la composition et l'innocuité d'engrais organiques. L'information spécifique au cadmium n'était pas communiquée. La DGCCRF a rapporté que des « anomalies relatives aux autocontrôles » étaient « fréquemment observées » (en particulier pour les engrais organiques, amendements organiques, supports de culture et engrais de mélange), ce qui suggère, sur cet aspect, une mise sur le marché peu maîtrisée (DGCCRF, 2023)⁹⁹ (cf. section 7.3.4.2 relative aux enjeux de surveillance et de contrôle des MFSC).

7.3.2.3.2 Limites en cadmium recommandées

Les valeurs proposées dans le projet de décret français encadrant l'innocuité des amendements organiques, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture en France (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023) convergent avec les limites européennes, variant entre 1,5 et 3 mg Cd kg⁻¹ MS selon les catégories de produits.

Dans ce contexte, **le GT réaffirme la précédente recommandation de l'Anses de tendre vers une concentration en cadmium égale ou inférieure à 1 mg Cd kg⁻¹ de MS dans les fertilisants d'origine organique** afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ pour l'ensemble des matières fertilisantes. Cette valeur permettrait de diminuer la

⁹⁷ Ce secteur n'inclut pas les effluents d'élevage bruts ou les Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux (MIATE) abordés dans le point suivant.

⁹⁸ Syndicat professionnel représentant les entreprises qui fournissent les matières fertilisantes et intrants innovants des cultures végétales durables : supports de culture, paillages, amendements organiques, engrais organiques et organo-minéraux et biostimulants.

⁹⁹ www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/plan-de-contrôle-sur-les-fertilisants-supports-de-culture

contamination en cadmium des sols et des denrées alimentaires, afin de préserver la santé du consommateur (Anses, 2019a, 2021).

7.3.2.4 Incitations à la réduction de la concentration en cadmium dans des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR)

7.3.2.4.1 *Etat de la situation actuelle*

Selon Belon et al. (2012), les effluents d'élevage d'une part, et les boues et composts d'autre part, contribuent en moyenne aux apports en cadmium dans les sols français à hauteur de 25% et 5%, respectivement. Il importe donc d'apporter un éclairage sur les catégories et volumes de matières concernées (effluents d'élevage, boues d'épuration urbaines, déchets urbains, effluents industriels, cendres issues de chaufferies de biomasse) et leurs voies de traitement (utilisation brute, compostage, digestion anaérobie) (cf. **Tableau 28**) (Houot et al., 2014, Centre d'études et de prospective, 2022).

Tableau 28. Principales voies de traitement applicables aux MAFOR prédominantes

MAFOR Traitement	Effluents d'élevage	Boues d'épuration urbaine	Déchets urbains			Effluents industriels
			Ordures ménagères résiduelles	Biodéchets triés à la source	Déchets verts	
Sans traitement	Seuls	Seules				Seuls
Compostage => <i>compost</i>	Seuls ou en mélange	En mélange	Seules	En mélange	Seuls ou en mélange	Seuls ou en mélange
Digestion anaérobie (méthanisation) => <i>digestat</i>	Seuls ou en mélange	Seules	Seules	Seuls ou en mélange	En mélange	Seuls ou en mélange
Chaulage		Oui	Oui			

Source : tableau reproduit à partir de Houot et al., 2014

Au total, 729 millions de tonnes de MAFOR sont produites en France annuellement, dont 300 millions de tonnes épandues sur les sols agricoles en tant qu'engrais et amendements. Les **effluents d'élevage** (fumiers et lisiers) représentent une part considérable du volume épandu (94%). Sur ce volume, la moitié est collectée puis épandue directement par les agriculteurs sur les parcelles de culture et les prairies, l'autre moitié étant utilisée sous forme de compost ou après méthanisation (ADEME, 2018). En 2018, l'épandage sur les exploitations où les effluents ont été produits représente en moyenne 42% des volumes de fertilisation phosphatée (en équivalent P_2O_5), contre 47% pour les engrais minéraux (Centre d'études et de prospective, 2022).

Concernant les **autres MAFOR** (6% du volume épandu), les proportions épandues sur les sols agricoles varient : c'est le cas de 73% des boues de stations d'épuration (dont 31% après

compostage)¹⁰⁰, de 14,5% des déchets ménagers assimilés (après compostage) et de 35% des déchets industriels organiques (dont 8% après compostage) (ADEME, 2018). La répartition de l'épandage des MAFOR sur le territoire est notamment liée à la géographie de leur production, aux pratiques agricoles et aux besoins des cultures. Selon une précédente expertise de l'INRAE sur la valorisation des MAFOR (Houot et al., 2014), dans les régions où se pratique l'élevage, l'épandage d'effluents issus des cheptels sur l'exploitation est historiquement prégnant. L'épandage de boues d'épuration urbaines, plus faible en volume¹⁰¹ et qui tend à être perçu comme un « service rendu par l'agriculture à la société », se pratique davantage dans les territoires où se trouvent des agglomérations et à destination des grandes cultures (Houot et al., 2014) (**Figure 30**, voir également figure 5, chapitre 4). Les volumes de cendres épandues, relativement plus faibles, sont moins documentés¹⁰².

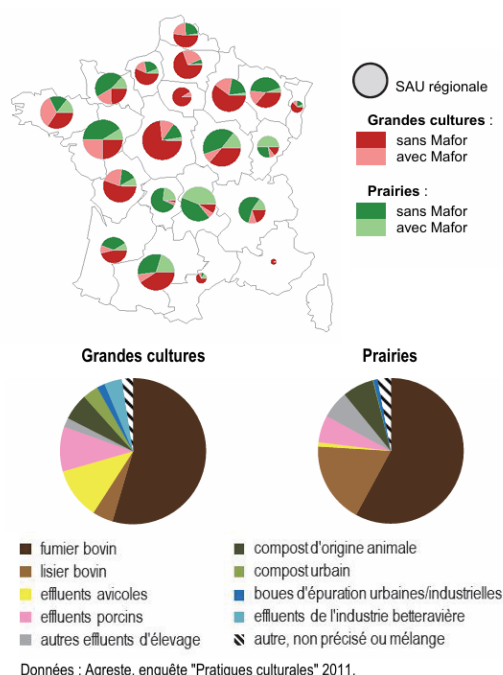


Figure 30. Répartition géographique et typologique des épandages de MAFOR organiques en France en 2011 (Houot et al., 2014)

Le statut réglementaire des MAFOR varie, notamment selon leur classement comme « sous-produit » (effluents d'élevage) ou comme « déchet » (boues d'épuration, déchets et effluents industriels, la plupart des digestats, cendres, sédiments...). Une part des MAFOR transformées peut aussi entrer dans la catégorie « homologué » ou « normalisé » (cf. point précédent). Les implications pour les apports de cadmium associés aux MAFOR de types « sous-produits » et « déchets » peuvent être distinguées en deux cas de figure :

¹⁰⁰ Plus précisément, selon le SYPREA, en 2023, 46,5% du volume de boues étaient destinées à l'épandage agricole, 40,9% au compostage, et 10,9% à l'incinération (source : audition).

¹⁰¹ Selon le SYPREA, le retour au sol des boues concerne environ 3 % de la SAU française (audition).

¹⁰² D'après la FEDENE, environ 65 000 tonnes de cendres (chiffres issus des adhérents FEDENE) sont épandues chaque année, chiffre montant à environ 100 000 tonnes / an en élargissant au-delà des seuls adhérents. La biomasse provient pour environ 80 à 90 % de plaquettes forestières, le reste de produits connexes de scieries (écorces, plaquettes...), de bois d'emballages ayant subi une sortie de statut de déchets, de plaquettes paysagères urbaines (source : audition).

- **Concernant les effluents d'élevage** : des concentrations en cadmium variables selon le type d'animaux (moyennes de 0,2 à 0,5 mg Cd kg⁻¹ MS, avec des valeurs maximales pouvant dépasser 1 mg Cd kg⁻¹ MS) ont pu être observés par Belon et al. (2012) et l'Anses (2018). **Ces concentrations ne font l'objet d'aucune réglementation**¹⁰³ (cf. chapitre 6), **ni de dispositifs de surveillance, ce qui est considéré comme une lacune importante par le GT.**
- **Concernant les boues de STEP et les cendres** : comme cela est détaillé dans le chapitre 6 (cf. section 6.3.2.1), ces matières font l'objet de limites en cadmium. Par ailleurs, leur épandage est réglementé et conditionné à des concentrations limites en éléments traces métalliques dans les sols concernés¹⁰⁴. Cela implique des exigences réglementaires en matière de traçabilité associées à un plan d'épandage (analyse des boues, analyse des parcelles, convention d'épandage avec l'agriculteur). Si la contribution moyenne des boues aux apports en cadmium est relativement faible à l'échelle des sols agricoles français (5% pour les boues et composts¹⁰⁵, voir *supra*), il convient cependant de noter que leur épandage ne concerne qu'une faible part de la surface agricole utile : cette contribution peut donc être plus importante à l'échelle d'une exploitation (McLaughlin et al., 2021). Les données issues des plans d'épandage sont communiquées aux pouvoirs publics¹⁰⁶, mais **le GT n'a pas connaissance d'une base de données représentatives des concentrations en cadmium dans ces matières fertilisantes**. De plus, comme susmentionné, la DGCCRF met régulièrement en œuvre un plan de contrôle sur les MFSC. Elle constate des manquements persistants par rapport à diverses obligations. Par exemple, en 2016, des dépassements fréquents (5 prélèvements sur 10) des limites en éléments traces métalliques (cuivre, zinc, cadmium) ont été identifiés dans les prélèvements de matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux (MIATE), ce qui reflétait, selon les enquêteurs, des **auto-contrôles insuffisants** (DGCCRF, 2016b, 2021, 2023).

7.3.2.4.2 Limites en cadmium recommandées

Le GT rappelle la précédente recommandation de l'Anses de tendre vers une **concentration en cadmium égale ou inférieure à 1 mg kg⁻¹ MS dans les fertilisants d'origine organique**, afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ **pour l'ensemble des matières fertilisantes** (Anses, 2019a, 2021).

¹⁰³ C'est également le cas dans le projet de réglementation « socle commun » en préparation.

¹⁰⁴ Arrêté du 08/01/98 interdisant l'épandage de boues sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols (2 mg Cd kg⁻¹ MS) ; Arrêté du 3/8/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE interdisant l'épandage de cendres sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols (2 mg Cd kg⁻¹ MS) ; Arrêté du 12/8/10 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation interdisant l'épandage de digestats sur les sols agricoles en cas de dépassement de la valeur limite de concentration en Cd dans les sols (2 mg Cd kg⁻¹ MS).

¹⁰⁵ Le GT souligne que cette contribution, basée sur une publication datant de 2012, devrait être actualisée.

¹⁰⁶ Voir l'outil informatique Web « SILLAGE » d'aide à l'instruction et au suivi des plans d'épandage de matières organiques : <https://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/page.php?idPage=24>

Cet objectif pose la question des **conditions susceptibles de garantir une concentration en cadmium la plus basse possible** dans une diversité de matières (effluents d'élevage, boues de STEP, engrais organiques et supports de culture homologués), soumises (ou non) à des contraintes réglementaires variées (cf. sous-section précédente).

Ce constat s'inscrit dans un contexte de politiques publiques encourageant l'utilisation des MAFOR comme étant issues de ressources renouvelables.

7.3.2.4.3 Contexte incitant à l'utilisation des MAFOR

Cette recommandation de limites sur les concentrations en cadmium dans les MAFOR est à mettre en perspective à l'aune des **politiques publiques menées depuis plusieurs années encourageant l'utilisation des MAFOR comme étant issues de ressources renouvelables et présentant des avantages pour favoriser la transition agroécologique** : réduction de la dépendance aux ressources minières à coût avantageux, développement de diverses filières de recyclage, apport de matières organiques et amélioration des propriétés des sols, stockage de carbone... (Cordell et al., 2009 ; Demay et al., 2022). D'où les mesures dont elles ont fait l'objet, par exemple :

- au niveau européen : dans le paquet économie circulaire, la stratégie *De la Ferme à la Fourchette*, ou encore la proposition de nouvelle Directive européenne sur la surveillance des sols et la résilience des sols¹⁰⁷, qui recommandent de privilégier les solutions circulaires permettant d'enrichir la concentration en matières organiques des sols ;
- au niveau national : le volet agricole de la Feuille de route économie circulaire (FREC), la Stratégie nationale bas carbone (Centre d'études et de prospectives, 2022).

Réduire les concentrations en cadmium dans les MAFOR est donc un objectif indispensable dans un contexte de politiques publiques encourageant l'utilisation des MAFOR dans une logique d'économie circulaire.

7.3.2.4.4 Conditions d'amélioration de la concentration en cadmium dans les MAFOR

Les acteurs des filières des matières fertilisantes auditionnés considèrent que les MAFOR ne peuvent, en l'état actuel, se substituer intégralement à l'apport d'engrais minéraux phosphatés, pour des raisons agronomiques et de disponibilité (ex. besoin pour certaines grandes cultures d'un apport en phosphore disponible à court-terme, avec un pilotage plus fin des quantités d'azote, de phosphore et de potassium apportées).

En l'état des pratiques actuelles, la réduction de la concentration en cadmium dans les matières fertilisantes doit donc être pensée globalement. Concernant le cadmium, l'amélioration de la qualité des MAFOR est donc une voie d'action nécessaire et complémentaire à un approvisionnement en engrais minéraux phosphatés à moindre concentration en cadmium (7.3.2.2.3) et à leur décadmiation (7.3.2.2.4).

¹⁰⁷ Directive du parlement européen et du conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 29 septembre 2025. Le Parlement européen devrait procéder à son vote final dans les semaines à venir. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils>.

- **Le cas des effluents d'élevage**

Il existe un cadre réglementaire général portant sur le stockage et l'épandage des matières fertilisantes en France sur les exploitations (plan d'épandage), incluant des dispositions sur le stockage (dalle béton, interdiction d'entreposer des matières fraîches en extérieur, temps de latence avant épandage...). Ce cadre consiste notamment à protéger les points d'eau pour éviter tout enrichissement indésirable des masses d'eau en nutriments (ex. Directive nitrates). Toutefois il n'accorde pas d'attention particulière aux éléments traces métalliques. Par ailleurs, la réglementation varie avec le statut d'installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE), les règles étant accrues à mesure que le nombre d'animaux sur l'exploitation augmente.

Ainsi, le GT identifie **l'absence de réglementation du cadmium dans les effluents d'élevage, actuellement et dans le projet de réglementation « socle commun »** (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023), **comme une lacune. Il identifie toutefois en principe plusieurs leviers d'action :**

- D'une part, il conviendrait d'entreprendre une **réflexion sur les modalités d'analyse possibles des effluents d'élevage à l'échelle des exploitations**, en appui à la gestion des intrants et, dans le cas présent, au respect des flux maximaux d'éléments traces métalliques dans les sols.
- D'autre part, il conviendrait de mener une **réflexion sur la teneur en cadmium dans les aliments du bétail et son devenir**, sachant notamment que les céréales produites en France y sont en grande partie destinées (cf. 7.3.3.1). Vraisemblablement, le cadmium retrouvé dans les effluents d'élevage provient essentiellement de l'alimentation animale, produite localement ou importée. De plus, certains aliments peuvent inclure des additifs minéraux ajoutés aux aliments pour soutenir la croissance ou leurs propriétés antimicrobiennes, susceptibles de contenir des traces de cadmium (McLaughlin et al., 2021). Il existe, aux niveaux européen et français¹⁰⁸, des teneurs maximales en cadmium dans les produits destinés à l'alimentation animale (cf. 6.3.2.1). Le GT considère qu'il conviendrait d'explorer si les moyens de contrôle qui y sont associés sont appropriés au regard de la contribution de ces sources à la contamination des denrées agricoles.

- **Le cas des boues de STEP et autres MAFOR**

Tel qu'évoqué dans le chapitre 6, un contexte réglementaire plus contraignant a encouragé ces dernières décennies des améliorations de la composition des boues de stations de traitement des eaux usées. D'après Houot et al. (2014), les concentrations en éléments trace métalliques (ETM) de ces boues en France sont inférieures aux seuils réglementaires.

Néanmoins, des non-conformités persistantes sur certaines MAFOR ont été identifiées dans le cadre de plans de contrôle de la DGCCRF (voir *supra*).

¹⁰⁸ Directive n°2002/32/CE et Arrêté du 12 janvier 2001 (modifié) fixant les teneurs maximales pour les substances et produits indésirables dans l'alimentation des animaux.

Les sources de contamination des MAFOR peuvent être très diverses, incluant les eaux usées d'origine industrielle, des collectivités ou encore les eaux pluviales. La réduction de cette contamination d'origine résiduaire passe donc, de façon cyclique, par une réduction des apports en cadmium dans la diversité des sources et voies d'exposition identifiées à l'échelle de la population. Cependant, le GT souligne que les opérations de traitement des MAFOR ont une incidence sur leur concentration en ETM : de façon générale, les procédés d'élimination d'eau ou de matière (séchage, digestion, compostage, combustion) tendent à concentrer les ETM mais réduisent leur disponibilité. Les données disponibles varient toutefois selon les MAFOR (Houot et al., 2014). Par ailleurs, **des synthèses documentent les techniques de remédiation des éléments traces métalliques dans les eaux usées issues des élevages** (Hejna et al., 2021), **ou plus largement dans les environnements aquatiques** (Carolin et al., 2017). **Leur applicabilité dans le contexte français pourrait donc être plus précisément explorée.**

Les leviers identifiés ci-dessus soulèvent des enjeux de formation et d'accompagnement des exploitants, notamment en cas de concentrations en cadmium élevées repérées dans les effluents d'élevage (ex. adaptation de l'alimentation ou des conditions de pâturage pour limiter l'exposition des animaux) : ils seront plus généralement abordés dans la section à suivre sur les pratiques agricoles (7.3.3). Ils soulèvent aussi des enjeux de contrôle et de surveillance des produits distribués, qui seront évoqués dans la section 7.3.4.

7.3.3 Évolutions des pratiques agricoles

L'usage qui est fait des MFSC, et plus généralement des **pratiques agricoles permettant de limiter le transfert sol-plante du cadmium**, constituent une autre cible d'action analysée dans cette section.

Dans un premier temps, il sera démontré que figurent, parmi les principaux aliments contributeurs à l'exposition au cadmium en France, des denrées agricoles essentiellement ou en partie produites et consommées en France. Limiter, au niveau agricole, la contamination de ces denrées constitue donc un levier d'action pertinent.

Dans un second temps, pour limiter la contamination des sols et des productions (transfert sol-plante), outre la commercialisation de MFSC à moindre concentration en cadmium (cf. 7.3.2), sera soulignée **l'importance des analyses de sols avant épandage et d'un flux maximal d'apport de cadmium de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹**. Pour cela des solutions techniques seront évoquées, certaines étant à privilégier selon le type d'agriculture (conventionnelle, AB...) : fertilisation au plus près des besoins, agriculture de précision, pratiques agro-environnementales de remobilisation du phosphore présent dans les sols. L'importance d'informer et d'accompagner les producteurs sera également soulignée.

7.3.3.1 Repères sur la production des principaux aliments contributeurs

La contamination des denrées alimentaires par le cadmium, en particulier celles d'origine végétale, résulte principalement de la **présence de cadmium dans les sols**, liée à des facteurs naturels (géologie) et/ou anthropiques notamment en lien avec les **pratiques agricoles** (apports de fertilisants minéraux notamment les phosphates, épandage de boues

ou de matières organiques contaminées, pratiques influençant l'absorption racinaire par les plantes cultivées) (cf. chapitre 4).

L'identification des groupes de denrées contributrices à l'exposition alimentaire (EAT3, Anses, 2026) et à l'imprégnation humaine (Chapitre 5) **permet de remonter aux filières de production concernées et d'appuyer l'étude des options d'action les plus pertinentes en amont, au niveau agricole, ou au niveau des importations.**

Concernant la production des denrées importées, agir à la source (hors de France) apparaît peu envisageable, mais les TM réglementaires en cadmium dans les denrées alimentaires à l'échelle de l'UE (Règlement 2023/915) s'appliquent aux denrées importées de pays tiers¹⁰⁹.

Ces mêmes TM réglementaires s'appliquent également aux denrées produites dans l'UE et donc en France. La **maîtrise des sources de contamination en amont est donc un enjeu stratégique pour limiter l'exposition des consommateurs au cadmium, tout en soutenant une production agricole nationale durable et respectueuse des exigences sanitaires**. En effet, parmi les principaux aliments contributeurs à l'exposition figurent des denrées agricoles essentiellement ou en partie produites et consommées en France. Entre 2018 et 2020, selon FranceAgrimer (2023), le taux de couverture¹¹⁰ de la consommation française par la production nationale (exportations déduites) pour le blé tendre, les pommes de terre ou encore les légumes frais, était respectivement de 99%, 74% et 67% (**Figure 31**).

¹⁰⁹ Des initiatives existent néanmoins à l'échelle internationale, telles que le code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des fèves de cacao par le cadmium (FAO-WHO, 2022). Des discussions sont également en cours concernant l'élaboration d'un code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des aliments par le cadmium (FAO-WHO, 2024).

¹¹⁰ Selon FranceAgriMer, le taux de couverture de la consommation par la production nationale est calculé comme la part de consommation intérieure couverte par la production nationale (le reste de la production étant exportée). Plus ce taux est proche de 100% plus les besoins domestiques sont couverts par la production nationale ; plus il est bas, plus il y a de décalage entre offre et demande (insuffisance d'offre et/ou inadéquation qualitative). L'une des limites signalées par les auteurs est la difficulté de prise en compte des multiples transformations. Par exemple, les ingrédients des viennoiseries industrielles ne peuvent pas être inclus (FranceAgriMer, 2023).

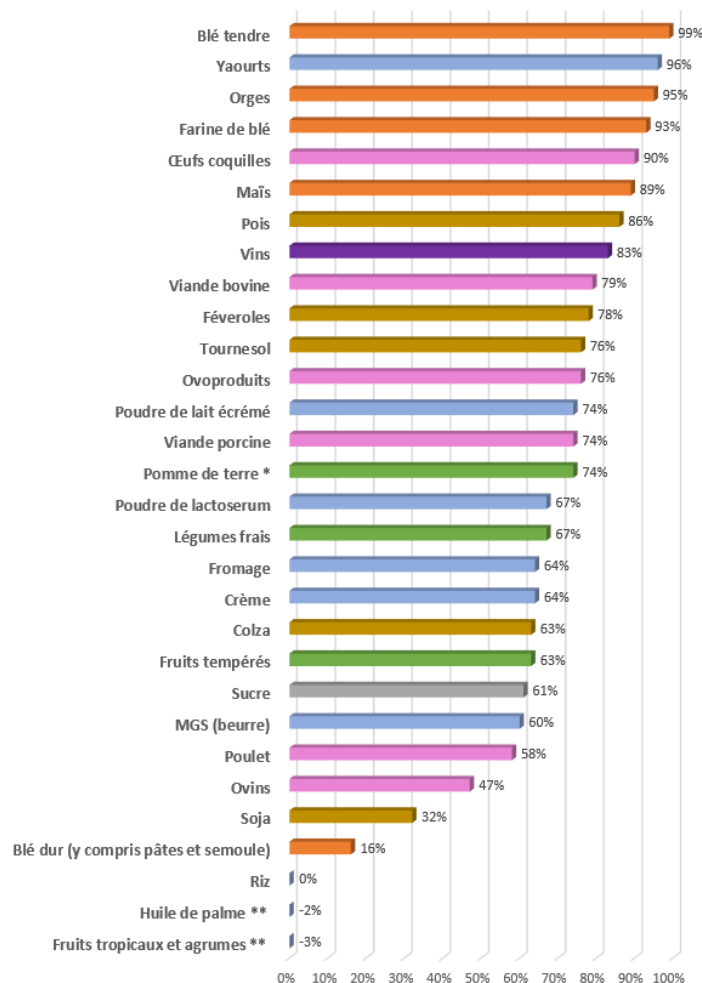


Figure 31. Taux de couverture de la consommation française par la production nationale (matières premières agricoles ou produits de première transformation des principales filières agricoles et agroalimentaires, moyennes 2018-2020)

Source : graphique réalisé à partir de données FranceAgriMer, 2023, p. 14.

*en équivalent pomme de terre fraîche

** valeurs négatives du fait de quantités exportées supérieures aux quantités produites, non-expliquées dans les données ; possiblement du fait de variation de stocks ou de ré-exports.

Lecture du graphique : Les barres représentent la part de la production nationale (déduite des exportations) dans la consommation en France ; Code couleur : Vert : fruits et légumes ; Rose : viandes et œufs ; Bleu : produits laitiers ; Orange : céréales, semences et dérivés ; Jaune : oléoprotéagineux.

Les statistiques détaillées des filières corroborent ce constat et permettent de préciser l'origine et l'utilisation faite de ces denrées.

Par exemple, en 2023, sur les 8,6 millions de tonnes (Mt) de pommes de terre récoltées en France, moins de la moitié a été exportée. En tenant compte des importations, environ deux tiers des pommes de terre destinées à la consommation en France étaient issus d'une production nationale. Il convient néanmoins de noter l'importation de 2,25 Mt de pommes de terre en 2023, pour la plupart transformées.

Sur le marché intérieur, les pommes de terre sont transformées sous différentes formes (surgelées, déshydratées, en chips...) (cf. **Tableau 29**).

Tableau 29. Données sur la valorisation des pommes de terre produites et consommées en France

Filière française de pommes de terre	Production totale*^a : 8,62 Mt (2023) dont : ▪ Consommation (primeurs, demi-saison, conservation) : 7,15 Mt ▪ Féculerie : 0,73 Mt ▪ Plants : 0,63 Mt ▪ Dessus de plants : 0,12 Mt Exportations totales*^a : 3,85 Mt (2023) dont : ▪ Pommes de terre en frais : 2,88 Mt dont : ○ Consommation (primeurs, demi-saison et conservation) : 2,5 Mt ▪ Produits transformés (hors fécule) : 0,96 Mt Importations totales*^a : 2,25 Mt (2023) dont : ▪ Produits transformés (hors fécule) : 1,66 Mt ▪ Pommes de terre en frais : 0,55 Mt ○ Dont consommation (primeurs, demi-saison et conservation) : 0,47 Mt
	Transformations sur le marché intérieur (période 2023-2024)^b : Produits transformés à base de pomme de terre : approvisionnement des usines françaises pour 1,61 Mt dont 1,23 Mt produites sous contrat, 130 000 t achetées sur le marché libre, 244 000 t importées : – 67% pommes de terre surgelées – 13% pommes de terre déshydratées – 14% chips – 6% autres produits Fécule de pomme de terre : livraison de 66 505 t de pommes de terre ; fécule native utilisée : • 74 % par l'industrie agro-alimentaire • 18 % pour les autres industries non-alimentaires • 6 % par la papeterie/cartonnerie • 2 % par la chimie/pharmacie

Sources : ^a Agreste (2024) ; ^b FranceAgrimer (2025a)

Légende : Mt : millions de tonnes * quantités exprimées en eq. pommes de terre

Le constat est encore plus saillant pour les céréales : sur les 56 Mt collectées chaque année (principalement le blé tendre, le maïs et l'orge), un peu plus de la moitié est exportée tandis que les importations ne sont estimées qu'à hauteur de 1,6 Mt. Ces céréales sont en grande partie destinées à l'alimentation animale (consommation à la ferme, industrie) ou directement à l'alimentation humaine, notamment le blé tendre (produits de panification, biscuiterie, biscotterie) (cf. **Tableau 30**).

Tableau 30. Données sur la valorisation des céréales produites et consommées en France

Filière française de céréales	Productions et échanges (moyennes sur période 2019/20 à 2023/24) ^a : France 1^{er} producteur de céréales en UE (hors riz) ▪ Quatre grandes productions : blé tendre (54%), maïs (20%), orges (19%) ▪ Moyenne de <u>production de céréales</u> : 64,5 Mt ○ Près de 55 Mt collectées (86 %, le reste consommé / stocké à la ferme) ○ <u>30,6 Mt exportées</u> : 55 % de blé tendre, 21 % d'orges et 14 % de maïs <u>Importations de 1,5 Mt</u> (y compris riz) dont riz (41%), maïs (35 %) et blé tendre (15 %). Usages sur le marché intérieur : ▪ Utilisations humaines et industrielles (48 % en moyenne sur la période 2019/20 à 2023/24, dont 95% blé tendre, maïs, orges) ^a ▪ Utilisations fourragères (dont 93% blé tendre, maïs, orges) ^a ▪ Usages intérieurs sur période 2023-2024 (hors riz, maïs doux, ensilage) ^b ○ 9 Mt pour l'industrie de l'alimentation animale ○ 7,5 Mt pour l'alimentation humaine ○ 7,2 Mt consommés et stockés à la ferme ○ 4,5 Mt pour les exportations de produits transformés (amidon, malte...) ○ 2,1 Mt pour l'alcool éthylique (y compris bioéthanol) ○ 3 Mt pour d'autres usages (semences, freintes...)
<i>Blé tendre</i>	Filière blé tendre, farine, pain, biscuits et biscottes ^b : 34,4 Mt produites en France (2023-24) dont : ○ 16,4 Mt exportées ○ 5 Mt destinées à la <u>meunerie</u> (panification / biscuiterie) dont : ▪ 32% pour boulangerie et pâtisserie artisanale ▪ 28% pour industrie (biscuiterie, biscotterie, industries alimentaires) ▪ 26% pour boulangerie et pâtisserie industrielle ○ 4,5 Mt pour l'industrie de l'alimentation animale ○ 3 Mt pour l'autoconsommation et le stockage à la ferme ○ 2,2 Mt pour l'amidonnerie et glutennerie

<i>Maïs</i>	Filière maïs, semence et grain^b : 12,6 Mt produites en France (2023-24) dont : ○ 4,9 Mt pour l'alimentation animale (industrie, consommation à la ferme) ○ 4,1 Mt exportées ○ 1,5 Mt pour l'amidonnerie (dont export) ○ 0,5 Mt pour l'alcool éthylique (dont bioéthanol) ○ 0,5 Mt pour la semoulerie de maïs (y compris export)
<i>Orges</i>	Filière orge, malt, bière^b : 11,9 Mt produites en France (2023-24) dont : ○ 6,8 Mt exportées ○ 1,7 Mt en malterie (dont export malt) ○ 1,7 Mt autoconsommées et stockées à la ferme
<i>Blé dur</i>	Filière blé dur, semoule, pâtes et couscous^b : 1,6 Mt produites en France (2023-24, 2 ^{ème} producteur après l'Italie) dont : ○ 0,9 Mt exportées ○ 0,6 Mt pour la semoulerie de blé dur (dont export), essentiellement utilisées pour la fabrication de pâtes alimentaires et de couscous

Sources : ^a FranceAgrimer (2023), Intercéréales (2024)

Légende : Mt : millions de tonnes

Limiter la contamination à la source des denrées produites et consommées en France constitue donc un levier d'action pertinent pour contribuer à réduire l'exposition de la population française au cadmium, tout en garantissant la qualité sanitaire des productions nationales en comparaison aux denrées importées.

Dans ce contexte, plusieurs cibles d'action peuvent être envisagées en France pour limiter la contamination à la source, notamment la réduction des limites en cadmium dans les matières fertilisantes utilisées par les agriculteurs (cf. sous-section précédente, 7.3.2), et des actions au niveau des pratiques agricoles, détaillées ci-dessous.

7.3.3.2 Analyses de sol et abaissement du flux maximum d'apport en cadmium

7.3.3.2.1 *Recommandations visant la concentration en cadmium et le flux maximal de cadmium dans les sols agricoles*

Le sol est un support de culture. De sa qualité dépend également la qualité des végétaux cultivés. A cet effet, l'Anses (2018 p.171 et 2021) a souligné la nécessité de **caractériser les sols avant l'épandage** de matières fertilisantes (**engrais et/ou amendements**) **afin de vérifier le fond géochimique naturel** (cas des anomalies géochimiques) **et les éventuelles**

pollutions parfois non connues des agriculteurs. Des analyses de sol sont exigées par la réglementation pour l'épandage des boues de STEP, digestats de méthanisation et cendres, afin d'éviter un enrichissement excessif en éléments inorganiques persistants et (éco)toxiques tels que le cadmium dans les sols (cf. 6.3.2.1). **Dans un esprit de cohérence scientifique et réglementaire, le GT préconise d'étendre ces exigences à toutes les matières fertilisantes (analyse de sol, concentration maximum en cadmium autorisée dans les sols pour l'épandage).**

En termes de flux, le projet de réglementation française « socle commun » introduit un apport maximal annuel moyen admissible de 2 à 5 g Cd ha⁻¹ an⁻¹, en fonction des matières fertilisantes (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023).

Cette disposition réglementaire diffère de la recommandation de l'Anses préconisant un **flux annuel d'apport en cadmium n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole**. Ce flux a été recommandé dans le but de maîtriser la contamination des sols et des productions agricoles et, par conséquent, l'exposition alimentaire associée. Cette recommandation repose sur des travaux de bilan massique dans les matrices (sol, plante (grain de blé, pomme de terre), lixiviat) et de l'impact sur l'exposition alimentaire du consommateur au cours du temps en fonction d'une diversité d'itinéraires réalistes de fertilisation simulés dans le contexte français (Anses, 2018c & 2021 ; Carne et al., 2021).

Afin de favoriser l'application de cette recommandation de flux maximum en cadmium, une cible prioritaire consiste à réduire les concentrations en cadmium dans les MFSC. *Via* la réglementation européenne (UE 2019/1009) et française (projet de décret « socle commun »), il semblerait **cohérent que la qualité des MFSC soit améliorée en amont de leur commercialisation** et de leur épandage pour que les agriculteurs ne puissent accéder qu'à des MFSC de qualité adéquate pour éviter une pollution des sols. Aujourd'hui les agriculteurs font logiquement confiance lors de leurs achats d'agrofournitures à la réglementation en vigueur. Pour promouvoir la qualité des denrées alimentaires, il est donc indispensable d'améliorer la qualité des MFSC proposées aux agriculteurs (cf. section 7.3.2).

De plus, compte tenu de ces **recommandations pour caractériser les sols et maîtriser le flux de cadmium à ne pas dépasser, les sous-sections suivantes abordent les solutions, à l'échelle des exploitations, pour réduire *in fine* la concentration en cadmium dans les denrées agricoles**. Il peut s'agir d'**options techniques**, mais aussi de **différents moyens (formation, conseil)** pour accompagner une évolution des pratiques. En ce sens la variabilité locale des sols et des usages nécessite une approche différenciée. Le renforcement de la formation pour les agriculteurs, l'innovation agronomique, et la coopération entre acteurs (agriculteurs, chercheurs, pouvoirs publics) sont essentiels pour poursuivre la réduction de l'exposition humaine au cadmium. Ces aspects seront évoqués en trois temps : tout d'abord, les solutions techniques ; ensuite, les besoins de formation et d'accompagnement des acteurs concernés ; enfin, le cas d'une stratégie de gestion intégrée, en Nouvelle-Zélande.

7.3.3.2.2 *Adaptation des itinéraires techniques*

Le cadmium présent dans le sol peut être absorbé par les cultures en fonction de différents paramètres : la **nature du sol** (pH, matière organique, capacité d'échange cationique), les **pratiques culturales**, le **type de plante cultivée** et sa **capacité d'absorption**. A cet égard :

- Les leviers disponibles pour limiter la concentration en cadmium dans les grains de blé ont fait l'objet d'une revue de la littérature scientifique (Zhou et Li, 2022). La pertinence de certains paraît acquise (utilisation de variétés moins accumulatrices, recours à une fertilisation au plus près des besoins, apport de zinc, de matière organique¹¹¹ (composts/fumiers/lisiers), de biochar), tandis que pour d'autres, elle demeure à démontrer (application de régulateurs de croissance, de silicium, de nanoparticules, de micro-organismes). En France, l'outil Bléssûr¹¹² de prédiction du risque de non-conformité du blé dur au regard de sa concentration en cadmium intègre la variété (32 disponibles) comme facteur de variation d'accumulation du cadmium dans les grains, ainsi que plusieurs caractéristiques agronomiques courantes (pH, teneur en carbone organique notamment) permettant d'évaluer la phytodisponibilité du cadmium dans les sols. Le programme de recherche BSWheat (ANR 2023-27) porté par l'INRAe a pour ambition de cribler plusieurs dizaines de variants de blé dur et de blé tendre pour l'existence d'allèles associés à l'accumulation de différents éléments traces, dont le cadmium¹¹³. Les recherches devraient aboutir à la mise à disposition des sélectionneurs de cultivars peu accumulateurs, et ayant des rendements satisfaisants.
- Concernant la pomme de terre, plusieurs solutions ont été testées en laboratoire, beaucoup moins au champ en conditions réelles. Parmi ces dernières, peuvent être citées : la culture de variétés moins accumulatrices (Brengi et al. 2021 ; Gray et al., 2019), l'apport de zinc (McLaughlin et al., 1995), l'ensemencement de bactéries limitant la phytodisponibilité du cadmium (Cheng et al., 2020)¹¹⁴.

Le GT émet une réserve de prudence sur certaines de ces options d'action :

- De précédentes expertises de l'Anses soulignent que certaines pratiques immobilisent les polluants, mais à court terme (ex. chaulage, apport de matières organiques) par des processus d'adsorption, précipitation, complexation. Elles ne constituent pas une solution durable et pérenne, ces procédés exigeant notamment des apports correctifs réguliers (donc coûteux et sujets à interruption). Ils **ne peuvent pas se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles**.
- Quant à la phytostabilisation, susceptible de conduire à une moindre mobilité du cadmium, elle est déjà déployée pour traiter des pollutions de sol d'origine industrielle. Toutefois, elle impose que les terrains soient libres de tout usage pendant plusieurs années et sans pression foncière. Cette exigence rend la technique peu compatible avec un maintien d'une production agricole. De plus, l'efficacité de la stabilisation du

¹¹¹ L'apport de matières organiques (ex. effluents d'élevage) peut, dans certaines conditions (pH, pouvoir complexant de la matière organique, présence d'oxydes/minéraux, composition ionique, etc.) contribuer à réduire la biodisponibilité du cadmium et d'autres métaux lourds dans les sols, mais une augmentation peut aussi être liée à la présence de carbone organique dissous (Yu et al. 2023). C'est pourquoi, comme évoqué dans la section 7.3.2, il importe que l'apport de cadmium *via* un apport de matière organique soit minimisé, par une amélioration de la qualité des matières fertilisantes, la prise en compte du flux de matière à la parcelle ainsi que du fond géochimique naturel.

¹¹² <https://ispa.bordeaux.inra.fr/services/blesur/>

¹¹³ <https://bswheat.hub.inrae.fr/bswheat-en-bref>

¹¹⁴ Outre le peu de données sur l'impact de ces solutions en conditions réelles, le GT souligne que certaines de ces options sont susceptibles de soulever des préoccupations en termes de conformité aux exigences réglementaires relatives à la mise sur le marché des MFSC.

cadmium et donc de la réduction des transferts dans l'environnement dépend de la santé du couvert végétal. Un suivi de la biomasse et de la santé des plantes est donc à prévoir pour estimer l'efficacité dans le temps de la phytostabilisation.

- Enfin, les recherches sont actives pour mettre à disposition des exploitants des variétés moins accumulatrices, surtout pour les céréales ; elles méritent d'être soutenues. Toutefois, le recours à ces variants constitue une solution complémentaire moins protectrice que celle visant une limitation des intrants cadmiés en agriculture.

Par ailleurs, en matière de **pratiques de fertilisation**, des travaux d'analyse du bilan en phosphore sur les sols agricoles français entre 1920 et 2020 (Guejjoud et al., 2024) démontrent, en moyenne sur l'ensemble de la période, des apports (engrais minéraux, engrais organiques, dépôts atmosphériques) supérieurs aux exports (récoltes, pâturage). Récemment, la situation s'est améliorée et en 2020, les auteurs constatent un quasi-équilibre : pour les surfaces cultivées, les apports de phosphore (notamment sous une forme minérale) se stabilisent et sont compensés par les exports de denrées produites. D'une part, cela a pour conséquence positive une limitation des exportations vers les milieux aquatiques et donc les phénomènes d'eutrophisation associés¹¹⁵. D'autre part, ces résultats indiquent que l'utilisation régulière de phosphate minéral maintient une nutrition phosphorée adéquate, mais le GT souligne que cela a pour conséquence d'entretenir l'enrichissement en cadmium dans les sols et, par conséquent, la contamination des productions agricoles associée perdure. Par conséquent, le GT considère que **la pratique d'une fertilisation au plus près des besoins peut être promue de manière plus systématique qu'actuellement**, notamment par des taux d'application et des choix de fertilisant tenant compte des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées, au moyen d'outils adaptés (voir par exemple l'approche néo-zélandaise en 7.3.3.2.4). Cela permet par ailleurs de réduire la dépendance aux engrais minéraux phosphatés, une ressource non-renouvelable, tout en préservant la fertilité acquise du sol (Demay et al., 2022).

A cet égard, le GT considère également que la **remobilisation du phosphore du sol, stocké sous des formes chimiques peu disponibles pour les cultures, constitue une voie complémentaire** visant à limiter l'usage d'engrais minéraux phosphatés. Des pratiques agro-environnementales sont développées à cet effet (co-cultures, cultures intermédiaires, inoculation de micro-organismes solubilisant le phosphore inorganique). En ce sens, limiter les pertes en phosphore résultant de l'infiltration ou du ruissellement de l'eau peut induire une diminution des besoins en fertilisants. Par exemple, l'incorporation de résidus de culture dans les sols ou la mise en place de couverts végétaux sont cités comme des choix techniques possibles (Centre d'études et de prospective, 2016).

Enfin, le GT rappelle également que l'apport d'engrais minéraux phosphatés (la roche broyée est en effet considérée comme un produit naturel) est autorisé en agriculture biologique : celle-ci est donc potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium (cf. encadré ci-dessous).

¹¹⁵ L'eutrophisation d'origine anthropique désigne le « syndrome d'un écosystème aquatique associé à la surproduction de matières organiques induit par des apports anthropiques en phosphore et en azote » ce qui correspond à un processus d'accumulation de matières organiques et d'éléments nutritifs (nitrates et phosphates principalement) dans les eaux de surface (fluviales, lacustres ou littorales), pouvant perturber l'équilibre des écosystèmes aquatiques (source : <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/expertise-eutrophisation-resume-8-p-1.pdf>).

Encadré 2 : Cas de l'agriculture biologique

Tel qu'évoqué dans le chapitre 6, il convient de noter que **l'apport d'engrais minéraux phosphatés est autorisé en agriculture biologique (AB)**, par exemple sous forme de phosphate naturel tendre ou de phosphate aluminocalcique (Règlement d'exécution UE 2021/1165, Annexe II). Pour ces intrants, les concentrations limites en cadmium sont les mêmes que celles figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 relatif à l'harmonisation de la réglementation des fertilisants sur le marché européen (60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅).

Dans leur revue de littérature comparant les implications pour la santé de l'AB et de l'agriculture conventionnelle, Mie et al. (2017) concluent à une teneur probablement plus faible en cadmium dans les cultures céréalières en AB (pas de différence pour les autres cultures), sur la base des résultats de deux méta-analyses, dont les résultats sont toutefois divergents. Plus récemment, dans leur revue de littérature portant sur la gestion des sols et des cultures en AB, Rempelos et al. (2022) exposent les conclusions de revues de littérature et méta-analyses sur le sujet, et signalent qu'une moindre contamination en cadmium des céréales produites en AB a été constatée par rapport à l'agriculture conventionnelle d'après des études expérimentales. Les auteurs concluent aussi que les données d'enquêtes auprès des exploitations agricoles et détaillants ne montraient pas de différences significatives. Selon les auteurs, cette divergence pourrait s'expliquer par le fait que, dans les études expérimentales, l'usage d'engrais minéraux était généralement exclu des parcelles en AB, alors qu'en conditions réelles, le phosphate naturel tendre est utilisé dans de nombreuses exploitations en AB.

Par ailleurs, des matières organiques sont largement apportées sur les parcelles en AB (Centre d'études et de prospective, 2023). Or, elles sont susceptibles d'être contaminées en métaux (cf. 7.3.2.4.1), puisque la matière organique a une forte affinité pour ces éléments dont le cadmium (capacité d'adsorption et complexation), qu'elle peut immobiliser ou rendre mobile en fonction des conditions du milieu (Yu et al., 2023). L'usage de MAFOR peut donc être source de cadmium, en agriculture conventionnelle comme biologique, c'est pourquoi le GT insiste sur l'amélioration de la qualité de l'ensemble des MFSC (faible concentration en cadmium) afin de réduire les apports de cadmium au sol.

Enfin, le GT a souligné que certaines informations sur la qualité du sol ne sont pas connues par les agriculteurs : le fond géochimique naturel, certaines pollutions anciennes, etc. En AB comme en agriculture conventionnelle, l'exploitation n'est pas soumise à une analyse de sol, donc un agriculteur en AB peut s'installer à son insu sur un sol déjà contaminé en cadmium.

Ainsi, en l'état, **sauf à reconsidérer le cahier des charges de l'AB, celle-ci peut comme l'agriculture conventionnelle être impactée par la présence de cadmium. Ce constat renforce la nécessité d'une action globale et à la source sur l'évolution des pratiques agricoles et l'amélioration de la qualité des MFSC.**

La section suivante présente des voies d'information, de formation et d'accompagnement des acteurs des filières agricoles susceptibles de favoriser le respect des recommandations susmentionnées en matière d'analyse de sols et de maîtrise du flux maximal de cadmium dans les sols agricoles.

7.3.3.2.3 Besoins d'information et de formation des acteurs concernés

La question de la diffusion, vers les producteurs, des solutions déjà identifiées ou à venir doit se poser. Au préalable, il importe de mettre en place une communication spécifique auprès des agriculteurs dédiée à la problématique du cadmium et aux enjeux à long terme associés. Il s'agit ainsi de sensibiliser les professionnels aux sources de contamination, aux moyens de prévention et à l'impact des pratiques sur la qualité sanitaire des productions végétales.

Dans le cas de la **formation des futurs agriculteurs**, il existe déjà dans les filières agricoles des modules consacrés aux enjeux sanitaires et environnementaux, aux bonnes pratiques qui en découlent, et aux réglementations qui les concernent. Sous réserve d'une **sensibilisation des formateurs**, et d'une actualisation des enseignements, les jeunes agriculteurs devraient pouvoir intégrer dans leurs pratiques les adaptations requises pour répondre à la problématique du cadmium dans les denrées issues de leurs exploitations. Cela pourrait notamment inclure des formations et/ou un partage d'informations sur :

- Les sources de contamination, les mécanismes de transfert du cadmium dans la chaîne de production des denrées alimentaires, et les effets du cadmium sur la santé humaine, des écosystèmes, des plantes et animaux ;
- La réalisation d'analyse de sols (concentration en cadmium total et phytodisponibilité notamment) et le suivi de la qualité des amendements, pour renseigner la qualité du sol, favoriser une gestion des apports de fertilisants au plus près des besoins, piloter les systèmes développés sur les grandes parcelles en agriculture de précision¹¹⁶ promue par l'Union Européenne (p.ex. épandage à taux variable en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques) (Unité de la Prospective Scientifique, 2016) ;
- Le choix d'engrais et amendements à faible concentration en cadmium ;
- Les risques de transferts sol-plante des polluants persistants et (éco)toxiques, dont les métaux / métalloïdes ;
- Les pratiques agroécologiques de courtes rotations, couverts d'engrais verts, associations de cultures pouvant favoriser la remobilisation du phosphore naturellement présent dans les sols. Il s'agit d'une source locale de phosphore naturel disponible, qui peut fournir - sous réserve d'une solubilisation suffisante et de la formation technique mise en œuvre par l'agriculteur - une partie des besoins des plantes permettant ainsi une réduction des apports d'engrais minéraux commerciaux.
- A noter que des projets de recherche participative visent une autonomisation des agriculteurs (moins d'intrants et de risques environnement-santé et économiques). Pour exemple, le projet de recherche INRAe COTERRA¹¹⁷ explore, à la demande des agriculteurs et avec eux, le développement des couverts végétaux multi-services : amélioration de la fertilité des sols et de leur stabilité structurale pour réduire l'érosion.

¹¹⁶ L'agriculture de précision est ici définie comme un « concept faisant référence à l'utilisation de techniques numériques pour contrôler et optimiser les processus de production agricole » (Unité de la Prospective Scientifique, 2016).

¹¹⁷ <https://projet-coterra.fr/>

La **sensibilisation à la problématique du cadmium pour les agriculteurs déjà exploitants peut être assurée par différents canaux d'information**, les chambres d'agriculture notamment. L'adaptation des pratiques nécessite un investissement des instituts techniques. Le développement d'un outil facilitant le diagnostic des sols destinés à la production de blé est un exemple concret : l'outil « Bléssûr » développé par l'INRAe et Arvalis permet le calcul de non-conformité des grains de blé au regard de leur teneur en ETM, le cadmium y compris (Nguyen et al., 2021). L'outil impose de disposer de données physico-chimiques souvent connues (pH, matière organique, granulométrie, C/N) mais aussi celles sur **la concentration en cadmium dans le sol, dont il faudrait systématiser la quantification dans les parcelles agricoles**.

Le GT souligne que ces enjeux s'inscrivent plus largement dans les évolutions attendues de la profession en matière de gestion de la santé des sols, comme en atteste la proposition de nouvelle Directive européenne sur la surveillance des sols et la résilience des sols¹¹⁸, qui prévoit en ce sens des modalités de formation et de conseil à l'attention de la profession agricole.

En complément de ces actions de sensibilisation des utilisateurs, le GT souligne la pertinence d'une révision de l'étiquetage des matières fertilisantes sur le cadmium (voir aussi 7.3.3.2.2). Tel qu'évoqué dans le chapitre 6, la réglementation française de l'étiquetage (décret du Ministère de l'économie n°80-478 du 16 juin 1980) ne prévoit pas, actuellement, l'indication des concentrations en cadmium sur l'étiquette des matières fertilisantes ni de mention « faible teneur en cadmium ». **Il serait donc pertinent que les modalités d'étiquetage des matières fertilisantes soient réglementées de telle sorte que les utilisateurs puissent facilement identifier les produits à plus faible concentration en cadmium. L'étiquetage devrait également inclure des préconisations d'usage d'un engrais permettant aux utilisateurs de respecter le flux maximal de cadmium dans les sols agricoles, en tenant compte des apports de cadmium par d'autres intrants¹¹⁹, et en attirant l'attention sur les risques de dépassement.**

7.3.3.2.4 Intégration dans les politiques publiques : le cas de la stratégie néo-zélandaise

A l'échelle européenne et des États membres, des politiques agricoles ont progressivement intégré des mesures spécifiques à la gestion des métaux, notamment dans la politique agricole commune (PAC). Des réglementations sur les limites en cadmium dans les engrais (ex. : règlement UE 2019/1009) accompagnent ces efforts, incitant à une meilleure traçabilité des intrants (voir inventaire des réglementations sur les MFSC et pratiques agricoles dans le chapitre 6).

La problématique de la présence de cadmium dans les denrées agricoles est abordée au sein de différents États. La **stratégie mise en place par la Nouvelle-Zélande est la plus documentée**.

¹¹⁸ <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils/>

¹¹⁹ Il est à noter que faciliter l'application de ce type de préconisations impliquerait la mise en place d'un format d'information harmonisé sur les produits et, pour l'utilisateur, de disposer d'un outil de gestion intégrant le calcul de l'impact cumulé des matières fertilisantes utilisées sur le flux de cadmium et d'autres contaminants.

○ *Description de la stratégie néo-zélandaise*

Les autorités néo-zélandaises affichent sur cette question une **politique soucieuse de considérer en parallèle plusieurs enjeux jugés interdépendants : sanitaire, économique et écologique**. L'enjeu sanitaire priorise une maîtrise de la contamination des denrées en deçà des valeurs réglementaires. Cet enjeu est couplé à une volonté de préserver une activité économique, le dépassement de valeurs réglementaires étant considéré comme une entrave aux exportations. Parallèlement, les pouvoirs publics affichent une volonté de maintenir une flexibilité de l'usage des sols, c'est-à-dire ne pas exploiter aujourd'hui les sols en suivant des pratiques qui compromettraient demain leur utilisation, soit en tant que support de production agricole, soit pour tout autre service rendu à la population (support de biodiversité par exemple).

La gestion de la problématique du cadmium dans les sols et les productions agricoles a été confiée à un "*Cadmium Working Group*" (CWG, devenu à partir de 2011 le "*Cadmium Management Group*", CMG) responsable de l'élaboration de la stratégie à adopter et d'un compte-rendu annuel auprès des autorités. Ce groupe rassemble les représentants institutionnels (ministères de l'agriculture, de l'environnement, conseils régionaux), des acteurs de filières de production, l'association des producteurs de fertilisants néo-zélandais, les établissements de recherche (Rys, 2020)¹²⁰.

La vision intégrée de la problématique du cadmium dans les sols a amené le CMG à développer une stratégie pensée à l'échelle du territoire national, et en se fixant l'objectif à un horizon de 100 ans : « *To ensure that cadmium in rural production poses minimal risks to health, trade, land-use flexibility and the environment over the next 100 years* ».

La stratégie identifie plusieurs actions parmi lesquelles :

- la surveillance, pour identifier les situations à risques, s'assurer que les risques sont maîtrisés, et comprendre leur genèse afin de les prévenir ;
- la maîtrise de l'accumulation du cadmium dans les sols et la gestion des denrées ; prioritaires au regard des dépassements des valeurs seuils ;
- la promotion de la recherche de solutions pour gérer les risques ;
- la communication et la promotion des outils de gestion de risque.

La **première action** vise à connaître le degré de contamination des sols agricoles par le cadmium à l'échelle du territoire national, permettant d'identifier des situations à risque. L'industrie des fertilisants paraît assurer la majorité des analyses, également prises en charge par les autorités locales et les chercheurs. Dans tous les cas, les analyses requièrent le consentement des agriculteurs et des dispositions quant à la confidentialité des résultats sont mises en œuvre (Abraham, 2016). Elle comprend aussi une étude de l'alimentation menée par le ministère de l'Agriculture (*Ministry for Primary Industries*), avec un focus particulier sur le blé, les pommes de terre, les légumes-feuilles, les oignons. Complémentairement à cette étude, sont engagés des programmes d'analyses plus spécifiques sur le cadmium.

¹²⁰ <https://www.mpi.govt.nz/funding-rural-support/environment-and-natural-resources/land-and-soil-health/monitoring-cadmium-in-nz-soils/>

Concernant la **deuxième action** figurant dans la stratégie du CMG, les industriels producteurs de fertilisants avaient pris des initiatives, de manière volontaire, dès les années 90, avant même la mise en place du CWG, en s'imposant des concentrations maximales en cadmium dans leurs produits. La limite maximale est alors fixée à 280 mg Cd kg⁻¹ P, soit 122,3 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ (Sneath, 2020), alors que les concentrations pouvaient auparavant dépasser 400 mg Cd kg⁻¹ P, soit 174 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ (Gray et Cavannagh, 2022). Leurs actions correctrices (sources d'approvisionnement modifiées) perdurent et ils sont parvenus à produire des fertilisants ayant des concentrations en cadmium largement en deçà de la limite fixée par eux-mêmes : une étude estime que les fertilisants commercialisés entre 2003 et 2015 ont une concentration moyenne en cadmium de 184 mg kg⁻¹ P (80,3 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) avec un P95 à 246 mg kg⁻¹ P (107,4 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) (Abraham, 2020).

Concernant l'**action 2** également, un élément central de la stratégie néozélandaise, soumise à révisions périodiques, réside dans la mise en place d'un système gradué de gestion des fertilisants ("*Tiered Fertiliser Management System*"). Il s'agit d'un guide de fertilisation qui impose des restrictions graduées, en matière de taux d'application et de type de fertilisant, en fonction des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées. Ce guide est présenté sous la forme d'un graphe (**Figure 32**) construit selon un axe vertical rapportant les concentrations en cadmium mesurées dans la parcelle d'intérêt (qui est complété par un second axe vertical faisant apparaître 5 catégories de sols selon leur contamination), et un axe horizontal correspondant à différentes classes de taux d'apport. Compte tenu de ces informations, l'agriculteur est en mesure de connaître le type de fertilisant le plus approprié.

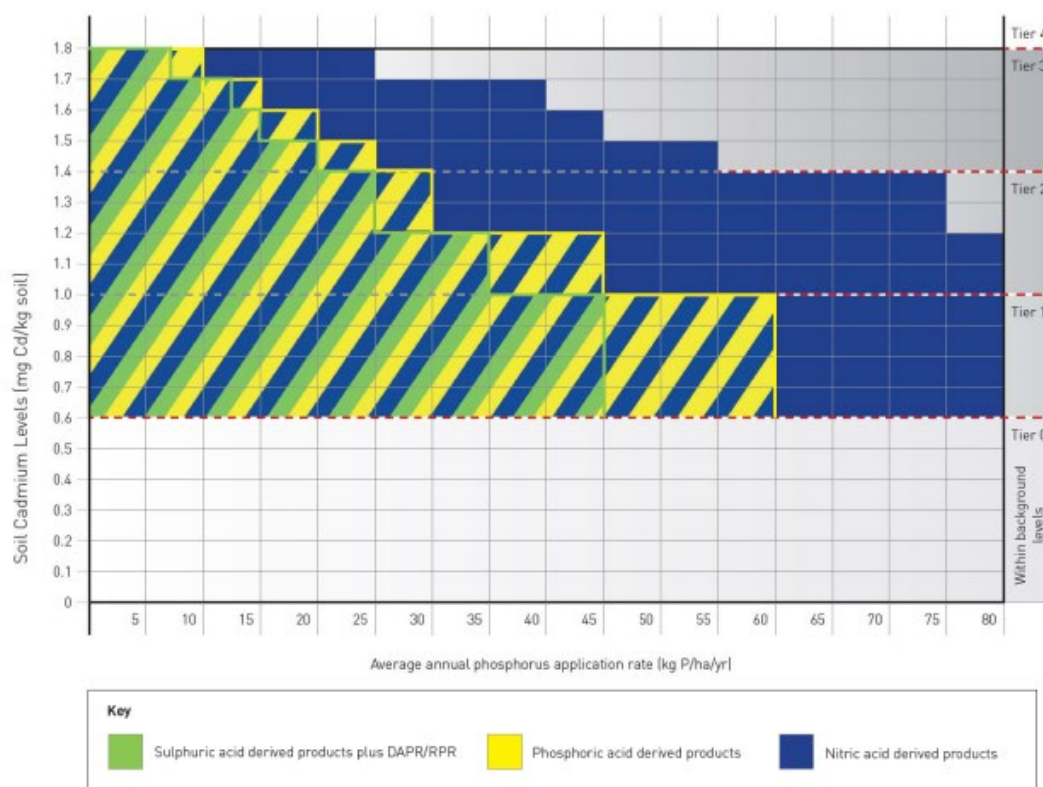


Figure 32. Guide de fertilisation appliqué par la Nouvelle-Zélande : choix d'un taux d'application et d'un type de fertilisant selon la contamination des sols en Cd (source : Sneath, 2020)

Le niveau de restriction suit l'occurrence de risque sanitaire :

Pour les sols du Tier 0 ($< 0,6 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ de sol), aucune restriction n'est affichée.

Au-delà, le contrôle de l'apport de fertilisant implique le choix d'un type de fertilisant, et d'un taux d'application.

Pour les sols les plus contaminés ($> 1,8 \text{ mg Cd kg}^{-1}$; Tier 4), tout apport est proscrit. Ce dernier seuil est défini par la stratégie du CMG : l'objectif de risques minimaux (en termes de santé notamment) à un horizon de 100 ans se traduit de manière opérationnelle par l'établissement d'une concentration en cadmium dans les sols qui ne devrait pas être dépassée à cette échéance. Cette concentration étant fixée à $1,8 \text{ mg Cd kg}^{-1}$, les sols ayant des niveaux de contamination dépassant déjà cette valeur sont logiquement identifiés comme ne devant pas recevoir d'apports.

L'approche est relativement protectrice dans la mesure où les calculs réalisés ignorent les pertes de cadmium depuis les sols, selon des mécanismes divers : érosion de sols, export par les récoltes et lessivage des sols.

La stratégie intègre le secteur de la recherche (**action 3**). Parmi les participants au CMG figurent des instituts de recherche du secteur public ou privé (industries des fertilisants, instituts techniques par filière) dont les travaux, menés conjointement, sont mis à disposition sur le site du ministère de l'Agriculture ("*Ministry for Primary Industry*"). Les sujets ont une portée générale (l'influence du type de sol sur l'accumulation du cadmium par exemple), ou

plus fondamentale (utilisation d'isotopes du cadmium pour mieux comprendre son devenir dans les sols, par exemple)¹²¹.

La stratégie prévoit une communication auprès de tous : grand public, professionnels et chercheurs sont ainsi informés au moyen de supports adaptés sur l'état des connaissances relatives au cadmium (**action 4**), via le site du Ministère de l'Agriculture. Par exemple, sur la page internet de cette administration sont téléchargeables gratuitement des fiches d'informations spécifiques à chaque production, notamment les pommes de terre ou les céréales.

La stratégie initiée en 2011 a fait l'objet d'une évaluation externe en 2018 (McLaughlin et Miller, 2018 ; Rys, 2020). Les évaluateurs ont noté de nombreux points positifs : (i) une diminution de l'apport en cadmium du fait d'une diminution marquée de la concentration en cadmium dans les fertilisants, (ii) un effort important de collecte de données concernant les concentrations en cadmium dans les sols, les fertilisants, (iii) l'identification de régions à surveiller particulièrement, (iv) la réalisation de programmes de recherches visant une meilleure compréhension de l'influence de caractéristiques des sols sur l'absorption du cadmium, ou (v) la mise en œuvre de méthodes permettant d'évaluer la biodisponibilité du cadmium, par exemple. Les recommandations visaient également une refonte partielle du système gradué d'apports en fertilisants, la mise en place d'un programme de surveillance périodique (5-7 ans), mais aussi le développement d'options de gestion basées sur un changement d'usage des sols, lorsque ces derniers présentent des concentrations en cadmium trop élevées pour un usage agricole. Enfin, l'évaluation recommandait une communication/formation plus forte vis-à-vis des exploitants agricoles, pas seulement basée sur la mise à disposition d'informations. La stratégie a donc été revue, prenant en compte ces recommandations. Elle sera de nouveau évaluée en 2026.

- *Transposabilité à la France*

La politique néo-zélandaise repose sur la réflexion et l'action d'une structure, le CMG, émanant des autorités publiques et regroupant tous les acteurs nationaux concernés par la problématique du cadmium dans les sols et les denrées agricoles. Un objectif commun est clairement exprimé et chacun contribue à sa réalisation, sans que paraissent être mises en place des mesures autoritaires.

Cette gouvernance pourrait sans doute être transposée en France (mais la mise en place ne serait pas immédiate) sans ignorer qu'existent des différences notables entre les situations néo-zélandaise et française : notamment, les concentrations en cadmium dans les sols français sont globalement moins importantes, et les concentrations en cadmium dans les fertilisants néo-zélandais demeurent élevées au regard des valeurs réglementaires nationales. Le modèle néo-zélandais peut néanmoins être un exemple pour certains aspects de la mise en place d'une stratégie nationale visant une évolution vertueuse des conditions de production des denrées alimentaires.

Il existe bien des organisations professionnelles pour les producteurs de céréales et de pommes de terre (AGPB et CNIPT par exemple), des structures représentant les metteurs sur le marché de matières fertilisantes (UNIFA, Afaïa), de cendres et biomasse (FEDENE), de

¹²¹ <https://www.mpi.govt.nz/funding-rural-support/environment-and-natural-resources/land-and-soil-health/cadmium-research/>

spécialistes de la fertilisation (COMIFER) ou de la valorisation agricole des boues (SYPREA), un environnement de recherche réparti dans les secteurs public et privé. A une échelle globale, les outils pour la surveillance des sols et des aliments existent également. Des aménagements permettraient d'améliorer la gestion des intrants à l'échelle des parcelles. Moyennant une mobilisation forte des acteurs et outils, une stratégie pourrait être définie et des actions identifiées. A plus court terme, des possibilités de gestion de la problématique du cadmium sont identifiables.

En effet, dans une certaine mesure, la stratégie néo-zélandaise pour préserver la flexibilité de l'usage des sols rejoint la politique française ayant vocation à garantir une agriculture qualifiée de durable.

Le code rural *via* le décret du 22 juillet 2003 définit les contrats d'agriculture durable :

“Le contrat d'agriculture durable a pour objet d'inciter l'exploitant qui le souscrit à mettre en œuvre un projet prenant en compte les fonctions environnementale, économique et sociale de l'agriculture mentionnées à l'article 1er de la loi du 9 juillet 1999 d'orientation agricole”. Plus précisément : « Le contrat porte sur la contribution de l'activité de l'exploitation à la préservation des ressources naturelles, à l'occupation rationnelle et à l'aménagement de l'espace rural en vue notamment de lutter contre l'érosion, de préserver la fertilité des sols, la ressource en eau, la diversité biologique, la nature et les paysages. Il peut également comprendre des objectifs économiques et sociaux, notamment en matière de diversification d'activités agricoles, de développement de filières de qualité et d'emploi.” Les cahiers des charges des actions sont définis par les préfets après avis des commissions départementales d'orientation de l'agriculture. L'échelle d'action est donc l'exploitation agricole avec un arbitrage à l'échelle départementale¹²².

Le contrat « *définit les engagements de l'exploitant ainsi que la nature et les modalités des aides publiques accordées en contrepartie* ». Il s'agit donc d'un engagement volontaire, mais pas désintéressé. En aucune manière les outils existants ne sont coercitifs.

Par ailleurs, la **réglementation liée aux aides européennes pour l'agriculture (règlement 1257/1999) comporte des dispositions susceptibles d'être mobilisées.**

Ainsi, l'article 2 indique :

« Le soutien accordé au développement rural, lié aux activités agricoles et à leur reconversion, peut concerner :

- la reconversion et la réorientation du potentiel de production agricole, l'introduction de nouvelles technologies et l'amélioration de la qualité des produits ;*
- la préservation et la promotion d'une agriculture durable à haute valeur naturelle, respectueuse des exigences environnementales ».*

L'article 9 de ce même règlement prévoit qu'un soutien concerne la formation professionnelle des agriculteurs avec un but :

¹²² <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000413690>

« de préparer les agriculteurs et les autres personnes engagées dans des activités agricoles à la réorientation qualitative de la production, à l'application de méthodes de production compatibles avec l'entretien et l'amélioration du paysage et la protection de l'environnement et des normes applicables en matière d'hygiène et de bien-être des animaux, ainsi qu'à l'acquisition du niveau de qualification professionnelle nécessaire à la gestion d'une exploitation économiquement viable »

Les articles 21 à 24 exposent la possibilité de soutien européen pour les actions à visée agro-environnementale. Plus pertinent encore, les articles 24 bis à 24 quinquies concernent le domaine de la qualité alimentaire :

« Le soutien aux méthodes de production agricole visant à améliorer la qualité des produits agricoles et à assurer leur promotion contribue aux objectifs suivants: a) fournir des garanties aux consommateurs sur la qualité du produit ou des méthodes de production utilisées grâce à la participation des agriculteurs à des régimes de qualité tels que définis à l'article 24 ter; b) obtenir une valeur ajoutée pour les produits agricoles primaires et accroître leurs débouchés commerciaux; c) améliorer l'information des consommateurs sur la disponibilité et les spécifications de ces produits. »

7.3.3.3 Conclusion : des possibilités d'évolutions, un accompagnement nécessaire

En complément de l'impératif de réduction de la concentration en cadmium dans les MFSC, cette section a mis en évidence l'intérêt d'une évolution des pratiques de production agricole au niveau national, en particulier pour les denrées contribuant le plus à l'exposition au cadmium de la population générale.

En ce sens, le GT recommande **d'étendre l'exigence de caractérisation de la concentration en cadmium dans les parcelles agricoles et de respect de concentrations maximales, à déterminer dans le cadre de futurs travaux, avant l'épandage de toutes matières fertilisantes**. De plus, il recommande de **fixer un flux annuel n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole**.

En pratique, le GT considère que la **pratique d'une fertilisation au plus près des besoins** doit être promue de manière plus marquée qu'actuellement, notamment par des taux d'application et des choix de fertilisant tenant compte des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées, au moyen d'outils adaptés. Il souligne également l'intérêt de s'appuyer sur des **pratiques agro-environnementales permettant de remobiliser le phosphore stocké dans les sols**, comme levier pouvant contribuer à limiter les apports extérieurs. Le GT recommande que de telles évolutions soient accompagnées par des mesures de **formation / information / accompagnement des agriculteurs et acteurs du conseil agricole** sur la problématique du cadmium, en fonction des besoins.

Enfin, le GT recommande le soutien à toutes voies de recherche permettant de limiter la charge en cadmium des sols et l'exposition au cadmium des consommateurs.

7.3.4 Amélioration du contrôle et de la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires

Dans cette section sont précisés les mesures et dispositifs existants en matière de contrôle et de surveillance du cadmium le long de la chaîne de production des denrées alimentaires. Ils permettent de mettre en évidence des options d'action pour améliorer la situation actuelle. **Les améliorations recommandées doivent être considérées en cohérence avec les recommandations d'action énoncées par le GT dans les sections précédentes**, en particulier celles portant sur des évolutions réglementaires (p.ex. **révision des TM en cadmium dans les denrées alimentaires, abaissement des limites en cadmium dans les MFSC**) ou sur des besoins de surveillance renforcée, afin de combler un manque de données.

7.3.4.1 Denrées alimentaires

En 2014, la Commission européenne a publié des recommandations (2014/193/UE) visant à réduire les niveaux maximaux de cadmium dans les denrées alimentaires les plus contributrices à l'exposition de la population, telles que les céréales, les pommes de terre et les légumes. Ces recommandations encourageaient les agriculteurs et les acteurs de la chaîne de production des denrées alimentaires à mettre en œuvre progressivement les mesures d'atténuation disponibles. Lorsqu'il apparaissait nécessaire d'identifier des stratégies de réduction appropriées, par exemple en lien avec des cultures ou des zones géographiques spécifiques, les États membres étaient invités à entreprendre des études ou des recherches pour combler les lacunes en matière de connaissances. Ainsi, **l'évaluation de données plus récentes recueillies *a posteriori* a permis l'abaissement ou l'établissement des teneurs maximales en cadmium pour de nombreux produits** (Règlement 2023/915).

La plateforme SCA, dont le rapport sur le cadmium (2023) est basé sur l'analyse de données de surveillance françaises collectées entre 2010 et 2019 à partir de différents dispositifs, recommandait d'acquérir davantage de données pour réaliser une analyse plus approfondie de certaines catégories d'aliments dont les données accessibles sont limitées. Ces catégories concernent les légumes, les herbes fraîches, les champignons, les produits issus de la panification, les biscuits, les céréales pour petit-déjeuner et les algues. Concernant cette dernière catégorie, bien qu'il n'y ait pas de seuil réglementaire européen pour les algues séchées (hors compléments alimentaires), 53,5% (15/28) des échantillons d'algues analysés dépassaient le seuil défini par l'Anses (saisine 2017-SA-0070) de 0,35 mg kg⁻¹ MS.

De même, il était recommandé de documenter plus précisément la composition de certains produits transformés réglementés, tels que les préparations de suite et laits en poudre destinés à l'alimentation infantile, afin de permettre une interprétation correcte des données associées.

Il a également été souligné par la plateforme SCA l'importance de collecter l'information relative à l'origine géographique des matières premières pour lesquelles ce facteur impacte fortement les concentrations en cadmium, notamment les fèves de cacao et dérivés du cacao ; ou encore de renseigner les variétés pour les matrices où la sélection variétale est un facteur connu impactant l'accumulation du cadmium, comme le blé dur. Ces informations permettent, entre autres, de dégager d'éventuels indicateurs de la contamination ainsi que la détection précoce des non-conformités lors de la mise en évidence de tendances ou évolutions temporelles des teneurs en cadmium, notamment pour des filières spécifiques. Le

regroupement des professionnels par filière favorise la surveillance de ces tendances, du fait de la volumétrie augmentée des données.

La DGAI définit annuellement un dispositif de surveillance à mettre en œuvre (IT DGAL/SDEIGIR/2024-617) qui est complété par des instructions techniques sectorielles (ex. DGAL/SDEIGIR/2025-94 concernant le plan de contrôle des contaminants chimiques dans les denrées alimentaires d'origine animale et végétale, 2025). Depuis 2024, à la suite de la réforme de la sécurité sanitaire de l'alimentation (SSA), créant la police sanitaire unique de l'alimentation (PSUA), le dispositif est programmé sur l'ensemble de la chaîne de production des denrées alimentaires. Il est axé sur les obligations réglementaires en premier lieu.

La stratégie nationale de surveillance du cadmium (et des autres ETM) repose sur le règlement (UE) 2022/932, complété par une analyse de risque nationale et locale en fonction des types de produits contrôlés. Chaque année, des couples contaminant/matrice sont définis, avec une répartition du nombre de prélèvements en fonction de la production régionale, puis départementale (pour les denrées alimentaires d'origine animale (DAOA)) et en fonction de la répartition de la population humaine régionale et départementale (pour les produits d'origine végétale).

La répartition des analyses entre les différentes catégories d'aliments dans les plans de contrôle et de surveillance repose donc principalement sur la production nationale et la répartition de la population. Bien que le ciblage repose aussi sur une analyse de risque, **la répartition des prélèvements ne reflète pas toujours la contribution réelle des aliments à l'exposition au cadmium**, cette répartition étant conditionnée par les exigences européennes. Ces contraintes laissent peu de marge de manœuvre aux autorités nationales pour ajuster la stratégie de prélèvement en considérant tous les enjeux sanitaires.

Par ailleurs, si certains éléments de ciblage sont faciles à considérer en cas d'existence d'un ancien site pollué, par exemple, ils sont plus complexes à utiliser lorsque la pollution est plus diffuse.

Lors de l'audition faite avec la DGAI, le BAMRA a souligné que les **marges d'action sur les aliments étaient limitées dans le cadre des plans de surveillance et que l'une des options serait d'agir sur les matrices fortement contaminées**, notamment en raison de la pollution diffuse, et de **travailler en amont sur les bonnes pratiques agricoles** (cf. section précédente, 7.3.3). Concernant la surveillance des denrées, la difficulté à faire évoluer les teneurs maximales (TM) au niveau européen rend difficile une action réglementaire rapide. Le principal levier reste donc d'assurer le respect des TM pour les matrices les plus contributrices à l'exposition et de renforcer dans cette optique la surveillance de la production végétale primaire.

Les résultats de la modélisation de l'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie permettent de conclure que les catégories d'aliments les plus contributeurs à l'exposition au cadmium de la population générale au cours de la vie sont des pommes de terre, des produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes. Considérant leur contribution importante à l'exposition, il ressort que certains aliments font partie des matrices prises en compte et contrôlées par le dispositif de surveillance DGAI (pommes de terre et tubercules, riz, blés et autres céréales raffinées, céréales infantiles).

Il serait donc pertinent de **renforcer la surveillance sanitaire du cadmium en ciblant ces aliments**, et en **tenant compte des sources diffuses de cadmium, en particulier l'usage**

d'engrais minéraux phosphatés, de fertilisants organiques (composts, fumiers) et de boues de station d'épuration. La mise en place de la surveillance devrait être axée sur les productions agricoles issues de zones où des apports réguliers de fertilisants ou de boues sont pratiqués, en s'appuyant sur l'identification des zones agricoles à risque, par croisement des pratiques d'amendement (notamment l'usage d'engrais minéraux phosphatés riches en cadmium), des données issues des plans d'épandage des boues de station d'épuration, et des cartes de contamination diffuse des sols (RMQS, bases BASOL/BASIAS, etc.).

Une surveillance renforcée des produits consommés par les enfants et très jeunes enfants pourrait constituer une mesure pertinente pour contribuer à la réduction de leur exposition au cadmium.

7.3.4.2 Matières fertilisantes et pratiques agricoles

En lien avec les recommandations énoncées ci-dessus, des enjeux relatifs aux contrôles et à la surveillance des MFSC, des sols et des pratiques agricoles se posent.

En premier lieu, les MFSC utilisées par les exploitants devraient pouvoir être considérées comme conformes à la réglementation, y compris en ce qui concerne les ETM dont le cadmium. Les **plans de surveillance et de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture** conduits en France par la DGCCRF ces dernières années indiquent qu'une part non-négligeable des MFSC présentent des non-conformités. A titre indicatif, pour ce qui concerne la composition et l'innocuité des MFSC, les résultats des enquêtes les plus récentes mettent en évidence (DGCCRF, 2023, 2025) :

- En 2021, sur 200 prélèvements, un taux de non-conformité de 45% concernant la composition et l'innocuité des produits, parmi lesquels 88 échantillons présentant des anomalies couvrant tous les paramètres de composition.
- En 2022 et 2023, sur les 289 analyses effectuées, le taux de non-conformités sur la composition et l'innocuité des produits atteint 49 %, incluant notamment des défauts d'analyses obligatoires et des dépassements de seuils en métaux lourds (dans des supports de culture notamment).

Plus généralement l'analyse des options d'action présentée dans la section 7.3.2 indique l'absence de base officielle de données représentatives des concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, ainsi que dans les engrais organiques, organo-minéraux et supports de culture. L'existence d'une compilation centralisée des données agrégées sur le cadmium, issues des plans d'épandage de MAFOR à l'échelle nationale n'a pas non plus été identifiée. **Il semble donc utile qu'une réflexion soit engagée afin que ce type de données soient collectées et disponibles, et de pouvoir suivre l'évolution des concentrations en cadmium dans les MFSC utilisées en France.**

A l'échelle des exploitations, l'analyse des options d'action relevant des pratiques agricoles dans la section 7.3.3 a mis en évidence l'intérêt, pour les exploitants, de pratiquer des analyses de sol relatives à la concentration en ETM, dont le cadmium, afin de guider leurs pratiques (itinéraires techniques) et favoriser le respect d'un flux maximal de cadmium dans leurs sols agricoles. A cet égard, le **GT a recommandé que les normes d'épandage imposant le respect d'une concentration maximale de cadmium dans les sols pour utiliser certains intrants** (boues de STEP, cendres, digestats de méthanisation) **soit appliqué aux autres MFSC.** En corollaire, un soutien adéquat devrait être apporté aux exploitants pour faciliter la

réalisation des analyses et développer les connaissances sur la notion de « sol cultivable ». De telles mesures permettraient également de mieux tenir compte du cadmium naturellement présent dans le fond pédo-géochimique de certains territoires français, qui peut occasionner une concentration relativement plus élevée en cadmium dans les sols (entre 0,5 et 2 mg.kg⁻¹) (cf. 4.2.1). Le GT recommande d'y mener une surveillance spécifique de la concentration en cadmium dans les sols, afin d'appuyer la mise en œuvre d'actions adaptées en cas de concentration anormalement élevée.

Le GT souligne enfin que **ces évolutions iraient dans le sens de la proposition de nouvelle Directive sur la surveillance des sols**, récemment adoptée par le Conseil de l'UE¹²³ et ayant fait l'objet d'un accord avec le Parlement européen plus tôt en 2025. Ce projet prévoit notamment l'établissement de valeurs visant à prioriser et mettre en œuvre des mesures de gestion des sols à caractère sanitaire. Dans ce contexte, **le GT souligne l'importance que les ETM, dont le cadmium, puissent être pris en considération dans l'établissement prochain des critères relatifs « au bon état de santé des sols »**, qui devront inclure la caractérisation de leur état physique, chimique et biologique. Non-contraignante pour les exploitants, le projet de Directive vise à amener les États membres à renforcer la surveillance et l'évaluation des sols, avec des exigences graduelles (Conseil de l'Union Européenne, 2025). Il est indiqué que le texte doit être soumis au vote final du Parlement européen, et que les États membres disposeront d'un délai de trois ans après son entrée en vigueur pour transposer les nouvelles règles dans leur droit national¹²⁴.

7.3.5 Réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique

7.3.5.1 Lutte anti-tabac : la priorité

L'analyse de l'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie présentée dans le chapitre 5 met en évidence que le tabac est une source majeure supplémentaire d'imprégnation au cadmium pour la population générale fumeuse en France (incluant les fumeurs actuels et passés sur l'ensemble de leur trajectoire de vie, à l'exclusion du tabagisme passif). Pour ce groupe, la contribution de l'inhalation de fumée à l'imprégnation atteint jusqu'à 43 % chez les adultes de 45-64 ans.

Compte-tenu de ces résultats, pour rappel (cf. 6.3.4.3), le GT a souligné que les implications et conséquences d'une mesure ciblant la teneur en cadmium dans les produits du tabac à fumer ou leurs émissions de cadmium pourraient être plus précisément étudiées.

Quelles que soient les conclusions de cette analyse, le GT attire l'attention, en premier lieu sur le fait que la lutte anti-tabac est la priorité, et que la **seule recommandation de santé publique consiste à dissuader les individus de fumer et/ou les encourager à réduire et arrêter de fumer dès que possible** (cf. 6.3.4.1).

En second lieu, le GT rappelle qu'**une vigilance serait quoi qu'il en soit requise dans la communication sur une telle mesure** : elle ne devrait en aucun cas donner l'impression aux fumeurs qu'il y aurait moins de risque à fumer une cigarette comportant moins de cadmium, compte-tenu de la nocivité des autres composants.

¹²³ <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils/>

¹²⁴ *Ibid.*

7.3.5.2 Teneur maximale / niveau maximal d'émission de cadmium dans les cigarettes

Cette section détaillera, dans un premier temps, des considérations relatives aux impacts potentiels de cette option d'action puis, dans un deuxième temps, les considérations relatives aux implications de mise en œuvre.

7.3.5.2.1 Impacts potentiels

- **Impacts sanitaires**

La nocivité du tabac n'étant plus à démontrer, les autorités publiques ont une volonté d'aller vers un arrêt du tabagisme. En France, un plan national de santé publique de lutte contre le tabac (2023-27) est en cours : il inclut 26 mesures visant, entre autres, la sensibilisation de la population, des lieux sans tabac, une hausse du prix ou l'accompagnement vers l'arrêt (MILDECA, 2023).

Tel qu'évoqué dans les chapitres précédents (4.3.2 et 6.4.3.1), à défaut de pouvoir quantifier la part imputable au cadmium dans le fardeau sanitaire du tabagisme, des publications scientifiques mettent en évidence des effets sanitaires néfastes du cadmium dans le tabac (cf. 4.3.2). Ainsi, selon Kim et al. (2023), l'accumulation de cadmium dans le sang due au tabagisme et au tabagisme passif contribue à l'augmentation du risque de mortalité toutes causes confondues. De plus, des organisations scientifiques (FDA, OMS) listent le cadmium dans le tabac comme une substance prioritairement préoccupante.

Pour préciser les impacts sanitaires d'une baisse de la teneur en cadmium dans les cigarettes ou de leurs émissions de cadmium, **le GT aurait souhaité pouvoir comparer le fardeau sanitaire imputable au tabac au fardeau sanitaire du cadmium dans le tabac. Il souligne également l'importance de tenir compte du fardeau sanitaire du tabagisme passif.**

Toutefois, en principe, la modélisation d'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie de la population française au cadmium développée dans le chapitre 5 pourrait permettre de modéliser les conséquences sur l'imprégnation en cadmium d'une baisse de la prévalence du tabagisme dans la population, et/ou d'une réduction des émissions de cadmium dans la fumée de cigarettes.

Concernant les émissions de cadmium dans la fumée de tabac, une telle analyse reposerait notamment sur des données de teneur en cadmium dans les cigarettes. Dans une précédente expertise sur la surveillance et le contrôle réglementaires des produits du tabac et produits du vapotage sur le marché français, l'Anses (2022) constatait l'existence de normes de prélèvement et d'analyse après fumage de cigarettes pour d'autres substances toxiques que le monoxyde de carbone, la nicotine et les goudrons, telles que les nitrosamines. Le rapport d'expertise soulignait toutefois qu'il « n'existe pas à l'heure actuelle de limite réglementaire associée et il ne semble pas possible de construire un niveau en-dessous duquel une cigarette démontrerait une nocivité significativement réduite ». Néanmoins, il était recommandé que les fabricants soient tenus de déclarer non seulement l'ensemble des ingrédients composant leurs produits, mais également la liste détaillée de tous les composés chimiques présents dans le produit fini avec leurs quantités » (Anses, 2022). A l'heure actuelle, il n'y a donc pas de surveillance systématique de la présence de cadmium dans les cigarettes importées en France. La surveillance devrait être un préalable à une réglementation.

- **Impacts socio-économiques**

Le GT souligne qu'à la condition de pouvoir évaluer la réduction du fardeau sanitaire associé au cadmium dans le tabac, les conséquences positives de cette baisse pour le système de santé pourraient alors également être évaluées sur le plan socio-économique (p.ex. par la méthode des dépenses de santé évitées).

En outre, la piste d'une teneur en cadmium réglementée dans le tabac n'aurait *a priori* pas de coût pour les filières de production en France, puisque le tabac est importé (cf. 6.3.4) et qu'il ne s'agit pas d'une mesure susceptible d'occasionner une baisse de la consommation.

A l'inverse, le GT souligne l'importance de ne donner en aucun cas l'impression aux fumeurs qu'il y a moins de risque avec une cigarette comportant moins de cadmium, par rapport à la nocivité des autres composants. **Un point de vigilance est soulevé quant à la nécessité de prévenir tout marketing des industries du tabac sur une telle mesure.** Il convient à cet égard de noter que l'industrie du tabac s'est intéressée de longue date à la possibilité de réduire la teneur en cadmium dans les cigarettes tel qu'en attestent plusieurs documents (Lugon-Moulin et al., 2004 ; Bertrand et al., 2017 ; Kudithipudi et Morris, 2020).

Le GT note toutefois que des niveaux maximaux d'émissions pour le goudron, la nicotine ou le monoxyde de carbone dans les émissions des produits du tabac sont déjà en vigueur dans l'Union Européenne¹²⁵ et n'ont pas, *a priori*, amené le consommateur à estimer que ces produits n'étaient pas dangereux pour sa santé.

7.3.5.2.2 Implications de mise en œuvre de la mesure

- **Pré-requis agronomique**

La faisabilité d'une réglementation sur la teneur en cadmium des cigarettes implique une évolution des pratiques agronomiques là où le tabac est produit. Une évolution de la réglementation européenne impliquerait *de facto* une évolution chez les producteurs pour avoir accès au marché européen.

A cet égard, le GT souligne que les moyens techniques pour réduire la teneur en cadmium dans les feuilles de tabac sont de même nature que pour d'autres végétaux, et ont fait l'objet de quelques publications, notamment de l'industrie du tabac. Il s'agit par exemple d'éviter de cultiver le tabac sur des sols contaminés, de limiter les apports de cadmium par les intrants agricoles, de sélectionner des variétés accumulant moins de cadmium dans les feuilles (Lugon-Moulin et al., 2004). Des procédés expérimentaux ont également été testés (ex. utilisation de champignons mycorhiziens à arbuscules) (Degola et al., 2015).

¹²⁵ Article n°3 de la directive européenne 2014/40/UE sur les produits du tabac

- **Faisabilité**

Pour rappel, l'article 3 de la directive 2014/40/UE sur les produits du tabac comporte des niveaux d'émissions maximaux de nicotine, monoxyde de carbone et goudron¹²⁶ compte tenu de leur toxicité ou de l'effet de dépendance que ces substances engendrent. Cet article ouvre aussi la possibilité aux États membres d'ajouter des substances ou de faire évoluer les méthodes de mesure des substances pour lesquelles des limites dans les émissions peuvent être fixées, selon les normes convenues par les parties à la Convention-Cadre de l'OMS sur la Lutte Anti-Tabac (CCLAT) ou par l'Organisation Mondiale de la Santé.

Toutefois, selon un récent rapport d'évaluation, aucun État Membre ne semble avoir ciblé d'autres substances que celles indiquées dans l'article 3 de la directive (UE, 2021).

La piste consistant à recommander l'instauration d'une teneur maximale en cadmium dans les cigarettes ou d'un niveau maximal d'émission des cigarettes pour le cadmium en prenant appui sur le cadre réglementaire et les normes actuelles visant la composition des produits du tabac (Directive européenne, CCLAT de l'OMS) semble pouvoir être évoquée. Sans entreprendre ici une analyse des enjeux juridiques associés, qui dépasse le périmètre de l'auto-saisine, le GT convient en principe qu'une telle piste devrait s'accompagner :

- d'un argumentaire scientifique sur les impacts de la réduction du cadmium *via* la cigarette (par rapport à une autre substance) ;
- d'une vigilance sur les arguments que les cigarettiers pourraient utiliser pour leurs produits : à cet égard, il a été mis en exergue l'importance que ce type de mesures ne soient pas accompagnées d'un étiquetage (WHO, 2018) ;
- En rappelant que la seule recommandation de santé publique est de ne pas fumer.

Par ailleurs, en vue de l'application de ce type de mesure, le Groupe d'étude de l'OMS sur la réglementation des produits du tabac (WHO TobReg) a proposé « l'utilisation de normes de performance pour imposer une réduction des concentrations de substances toxiques en identifiant les émissions moyennes ou toute autre mesure réalisable et en interdisant l'accès au marché aux marques présentant des concentrations plus élevées », considérant qu'il pourrait s'agir là « d'une première étape vers une réduction progressive des émissions globales de substances toxiques ». Il est toutefois précisé qu'aucun pays n'a mis en place une telle approche (WHO, 2018 :9).

Néanmoins, il existe un cadre normatif international dans le cadre duquel ces enjeux sont discutés. En effet, parmi les normes de la Convention cadre de lutte contre le tabac (CCLAT, OMS, 2003), l'article 9 sur la réglementation de la composition des produits du tabac indique que la Conférence des Parties, en consultation avec les organismes internationaux compétents, propose des directives pour les tests et l'analyse de la composition et des émissions des produits du tabac, et pour la réglementation de cette composition et de ces émissions.

D'après le projet de directives pour l'application des articles 9 et 10 (OMS, 2010), il n'y a pas de précision sur :

¹²⁶ A titre indicatif, « Goudrons » est un terme générique qualifiant la partie anhydre des émissions captées dans les filtres des machines à fumer (proxy des émissions de cigarettes) : ils incluent donc un grand nombre de substances. Le cadmium peut s'y retrouver sous forme de résidus.

« le genre d'interdictions ou de restriction que les Parties à la Convention peuvent appliquer aux ingrédients des produits du tabac. Il est entendu que, comme dans le cas de toutes les directives de la CCLAT, les Parties doivent examiner le marché dans leur pays et tenir compte de leur spécificité culturelle afin de déterminer la meilleure façon d'appliquer ces directives en vue de promouvoir la santé publique. »

Par ailleurs, selon des Directives partielles pour l'application des articles 9 et 10 (OMS, 2017), les objectifs de ces articles incluent de :

« contribuer à réduire les maladies et les décès prématurés attribuables au tabac en réduisant l'attractivité des produits du tabac, ainsi que leur pouvoir addictif (ou risque dépendogène) ou leur toxicité globale ».

Ils incluent également d'obliger à communiquer des informations utiles aux autorités gouvernementales sur :

« la composition et les émissions des produits du tabac, ainsi que sur leur toxicité et leur pouvoir addictif », une information jugée « nécessaire pour définir et mettre en œuvre des politiques, des activités et des réglementations pertinentes, concernant par exemple l'analyse plus poussée de la composition et des émissions des produits du tabac, la surveillance des tendances du marché et l'évaluation des affirmations de l'industrie du tabac. »

Plus récemment, la Conférence des parties à la CCLAT souligne les difficultés que soulève l'application des articles 9 et 10 de la CCLAT, notamment quant à la compréhension des obligations qu'ils impliquent, des capacités techniques et ressources humaines associées, de besoins financiers, des enjeux juridiques et politiques qu'ils soulèvent, et en raison de l'ingérence de l'industrie du tabac (WHO, 2023).

7.3.5.2.3 Conclusion

Pour conclure, réduire la présence du cadmium dans la cigarette permettrait de réduire l'exposition au cadmium issue de cette source. D'autres impacts sont à anticiper, notamment en termes de positionnement des industriels et de perception des fumeurs. Il est à noter qu'une telle mesure visant le cadmium serait susceptible de créer un précédent pour d'autres substances.

En termes de mise en œuvre, le cadre réglementaire et normatif indique qu'en Europe pourrait être envisagé que le cadmium soit ajouté aux substances pour lesquelles il existe déjà des teneurs maximales d'émission dans la réglementation.

Le GT n'a pas pu approfondir les implications de cette option en termes de politiques publiques, comme il ne dispose pas de compétence sur la faisabilité juridique de l'instauration d'une teneur limite en cadmium pour le tabac.

La mise en œuvre de cette mesure aurait d'autres implications :

- rappeler que la priorité est de ne pas fumer, et envisager d'y associer des recommandations plus générales sur la pratique du tabagisme (lutte anti-tabac) ;

- argumenter sur le ciblage du cadmium, avec la difficulté, en l'état actuel des connaissances, d'estimer le fardeau sanitaire imputable au cadmium dans le tabac ;
- ouvrir la réflexion sur d'éventuelles teneurs limites ou niveaux d'émissions maximaux pour d'autres substances ;
- prévenir tout lobbying / exploitation marketing avec la vigilance sur le fait qu'il ne s'agit pas de vendre un tabac qui serait « moins dangereux ».

Il est enfin noté que de précédentes expertises de l'Anses estiment nécessaire que les fabricants transmettent la liste détaillée de tous les composés chimiques présents dans le produit fini avec leurs quantités (Anses, 2022).

7.4 Synthèse de l'analyse

L'étude présentée dans ce chapitre s'est appuyée sur une analyse de la situation à risque et des domaines d'activités à cibler **pour réduire l'imprégnation de la population générale française au cadmium** (chapitres 2 à 6). Les **principales implications des options d'action** (impacts potentiels, contexte et enjeux de mise en œuvre) ont été prises en compte, à l'aide d'une analyse socio-économique.

Les **constats et recommandations** qui en découlent sont synthétisés dans le **Tableau 31** ci-dessous. Il reprend, par ordre d'apparition (7.3.1 à 7.3.5), les conclusions relatives aux cinq cibles d'action analysées. Pour rappel, quatre d'entre elles renvoient à des secteurs de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis le secteur des intrants agricoles jusqu'aux aliments, incluant les pratiques agricoles, ainsi que les activités de contrôle et de surveillance qui y sont associées. Une cinquième cible renvoie à la réduction de l'exposition par la voie tabagique.

Le GT conclut, au regard de la dangerosité du cadmium et des niveaux d'exposition observés dans la population générale, qu'il est impératif de mettre en place, au plus tôt, un panel d'actions complémentaires relatives à ces différentes cibles. Ces actions peuvent être développées de façon indépendante les unes des autres, même si des liens existent entre elles. Par exemple, les actions menées au niveau agricole ont des conséquences sur les options de maîtrise du risque d'exposition alimentaire. A cet égard, des éléments de priorisation sont avancés par le GT dans le chapitre 9.

7.4.1 Recommandations-clés

En matière de **réduction de l'exposition au cadmium par la voie alimentaire**, le GT, constatant que les teneurs maximales (TM) réglementaires actuelles sont insuffisamment protectrices, recommande de les abaisser sur une base sanitaire, au moyen d'une méthodologie dont il fournit les contours. Il recommande aussi de fixer des TM en cadmium dans les aliments contributeurs pour lesquels il n'en existe pas (algues, bulots). Il lui apparaît également essentiel de renforcer la diffusion d'informations générales sur la problématique du cadmium auprès du grand public, en mobilisant différents canaux de communication.

Au niveau agricole, afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ dans les sols, le GT recommande **d'abaisser la limite réglementaire en cadmium dans les engrais**

minéraux phosphatés, de telle sorte qu'elle soit $\leq$ à 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅, et de tendre vers une concentration $\leq$ à 1 mg Cd kg⁻¹ de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique. Pour les engrais minéraux phosphatés, deux moyens pourraient être mobilisés par les acteurs concernés : le recours à des sources d'approvisionnement en matières phosphatées à moindre concentration en cadmium, ou l'utilisation de procédés de décadmiation. Une analyse du marché permettrait de préciser les enjeux associés à ces deux voies. Pour les MAFOR, le GT recommande notamment d'entreprendre une réflexion sur les possibilités d'analyse des effluents d'élevage à l'échelle des exploitations, sur la teneur en cadmium dans les aliments du bétail et son devenir, ainsi que sur l'applicabilité de techniques de remédiation du cadmium dans les eaux usées.

D'autre part, en matière **d'évolution des pratiques agricoles**, le GT recommande d'étendre l'exigence de caractérisation de la concentration en cadmium dans les parcelles agricoles et de respect de concentrations maximales, à déterminer dans le cadre de futurs travaux, avant l'épandage de toutes matières fertilisantes. De plus, il recommande de fixer un flux annuel n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol. En pratique, il est recommandé de promouvoir des pratiques de fertilisation au plus près des besoins au regard de la problématique du cadmium, ainsi que des pratiques agro-environnementales permettant de remobiliser le phosphore stocké dans les sols. Il lui apparaît incontournable que de telles évolutions soient accompagnées de mesures de formation / information / accompagnement des agriculteurs et acteurs du conseil agricole, en fonction des besoins.

En matière de **contrôle et de surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments**, en cohérence avec les recommandations susmentionnées, le GT recommande, d'une part de renforcer la surveillance sanitaire du cadmium en ciblant les aliments les plus contributeurs à l'exposition, en tenant compte autant que possible des sources diffuses de leur contamination. D'autre part, des plans de surveillance et de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) conduits en France par la DGCCRF ces dernières années indiquent qu'une part non-négligeable des MFSC présente des non-conformités, y compris en matière de composition et d'innocuité des produits. Aucune base officielle de données représentatives sur les concentrations en cadmium dans les matières fertilisantes en France n'a été identifiée (engrais minéraux phosphatés, engrais organiques, organo-minéraux et supports de culture). L'existence d'une compilation centralisée des données agrégées sur le cadmium, issues des plans d'épandage de MAFOR à l'échelle nationale n'a pas non plus été identifiée. Selon le GT, il semble donc utile qu'une réflexion soit engagée afin que ce type de données soient collectées et disponibles, et de pouvoir suivre l'évolution des concentrations en cadmium dans les MFSC utilisées en France. Il insiste aussi sur l'importance que les ETM, dont le cadmium, puissent être pris en considération dans l'établissement prochain des critères relatifs à la qualité et à la résilience des sols à l'échelle européenne.

Enfin, pour **réduire l'exposition au cadmium de la population générale par la voie tabagique**, le GT recommande en premier lieu d'inscrire la prévention de l'exposition au cadmium par la voie tabagique dans le contexte de l'ensemble des mesures de lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif qui sont mises en œuvre. Par ailleurs, le GT indique que réduire la présence du cadmium dans la cigarette permettrait de réduire l'exposition au cadmium issue de cette source. Cette option n'a pas été approfondie dans la mesure où le GT ne dispose pas de compétence sur la faisabilité juridique de l'instauration d'une teneur limite en cadmium pour

le tabac. Il souligne qu'une vigilance serait quoi qu'il en soit requise dans la communication sur une telle mesure : elle ne devrait en aucun cas donner l'impression aux fumeurs qu'il y aurait moins de risque à fumer une cigarette comportant moins de cadmium.

7.4.2 Perspectives

Du fait du caractère multi-sources de l'exposition au cadmium et des données disponibles, il ne s'agissait pas ici de comparer de façon systématique tous les impacts de chaque option d'action. **Le GT a privilégié une analyse interdisciplinaire et intégrée, ciblant des options d'action spécifiques au cadmium**, prenant appui sur diverses données quantitatives et/ou qualitatives, lui permettant *in fine* de formuler des recommandations dans le délai imparti. **D'autres travaux apporteraient néanmoins un éclairage complémentaire.**

Tout d'abord, le principal levier d'action identifié par le GT pour réduire la teneur en cadmium dans les denrées alimentaires se situe au niveau agricole : il passe par une réduction des apports extérieurs de cadmium aux sols *via* les matières fertilisantes. Comme évoqué en préambule de l'analyse, cet objectif peut se décliner de deux manières :

- Par une **réduction de la concentration en cadmium dans les engrais** : l'analyse de cette cible a notamment conduit **le GT à recommander un abaissement de la limite en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés à hauteur de 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅**. Deux voies de mise en œuvre ont été identifiées : un approvisionnement en roches phosphatées ou produits dérivés présentant de moindres concentrations en cadmium, ou le recours à des procédés de décadmiation. L'éclairage apporté a permis de confirmer la pertinence de chacune d'elle. Toutefois, le recours à de telles options dépend de facteurs dépassant le cadre de l'analyse, notamment les ressources et stratégies des fournisseurs / fabricants, les accords commerciaux ou de collaboration avec les pays producteurs, le contexte économique et géopolitique. Une analyse du marché permettrait d'appuyer la mise en œuvre de ces options.
- Par une **diminution des apports d'engrais** : à cet égard, le GT a exposé l'intérêt d'une évolution des pratiques de fertilisation en lien avec la problématique du cadmium (analyse du sol, choix des intrants, quantités épandues, accompagnement des acteurs...). Toutefois, il souligne que la diminution des apports d'engrais renvoie à des **questions plus larges relatives aux besoins en phosphore et, donc, au modèle agricole** (choix des cultures, modes de production, souveraineté agricole et alimentaire...) qui, **bien qu'essentielle pour l'analyse de multiples implications sanitaires et socio-économiques** (qualité et résilience des sols, sécurité sanitaire des aliments, santé environnementale...) **dépassent la seule problématique du cadmium** et donc le périmètre de l'auto-saisine.

Par ailleurs, le GT indique qu'il n'a pas toujours été en mesure de documenter les impacts des options d'action identifiées, bien qu'elles puissent être motivées par d'autres considérations (situation à risque, lacune réglementaire, données contextuelles). Le cas échéant, le GT a formulé des **recommandations de recherche, de surveillance, et/ou de développement méthodologique**.

A titre complémentaire, le GT souligne que le modèle d'agrégation et de prédiction de la cadmiurie présentée dans le cadre du chapitre 5 pourrait être combinée à une modélisation

du transfert de cadmium dans différents compartiments de l'environnement « source to dose », et ainsi permettre de **tester l'impact de différentes options d'action sur l'imprégnation de la population** (p. ex. réduction de la concentration en cadmium dans les intrants agricoles, du flux de cadmium dans les sols, de la teneur en cadmium dans les aliments, ou dans le tabac). De précédents travaux de l'Anses, exposés dans ce chapitre, ont d'ailleurs déjà démontré les effets qu'aurait une baisse de la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés sur la pollution des sols, la contamination de certaines denrées, et l'exposition de la population (Carne et al., 2021). Sous réserve des données disponibles, cette approche pourrait être appliquée à d'autres sources et permettrait de comparer les bénéfices sanitaires de plusieurs options d'action.

De plus amples travaux, envisagés dans le cadre du projet PARC, pourraient consister à **comparer ces options au regard de la réduction du fardeau sanitaire associé au cadmium** qu'elles occasionneraient : ostéoporose, atteintes rénales, autres pathologies pour lesquelles un lien est avéré. En combinaison avec une évaluation socio-économique, d'autres implications (coûts et bénéfices d'un point de vue sociétal) pourraient alors être prises en compte (p.ex. gains en termes d'espérance et de qualité de vie, dépenses de santé évitées). Ces travaux pourraient notamment s'appuyer sur l'évaluation économique du fardeau de l'ostéoporose associé au cadmium, qui a été réalisée dans le cas de la France (Ougier et al., 2021). Par exemple, l'approche proposée par Pizzol et al. (2014) a permis d'estimer, au Danemark, les coûts de santé imputables aux apports de cadmium dans les sols agricoles par différents types d'intrants (boues de stations d'épuration, struvite, engrais minéraux phosphatés, fumiers porcins), en modélisant son accumulation dans les sols, son transfert dans diverses denrées agricoles, le risque associé de dépassement d'un seuil critique de cadmiurie à l'échelle de la population, et l'occurrence de maladies rénales et osseuses qui peuvent en découler. Leur analyse peut ainsi servir de base à une évaluation d'options d'action.

Tableau 31. Synthèse de l'analyse des cibles et options d'action

Options d'action		Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
Cible 7.3.1 : réduire l'exposition du consommateur par la voie alimentaire					
Abaissement des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires sur une base sanitaire		L'alimentation constitue la principale source d'exposition au cadmium de la population générale française. Or, les teneurs maximales (TM) réglementaires actuelles en cadmium fixées dans les denrées alimentaires commercialisées sont insuffisamment protectrices de la santé des consommateurs. Une révision des teneurs maximales dans la réglementation UE fixerait l'objectif à respecter lors de l'importation de denrées alimentaires et lors de la production de denrées agricoles en France. Des TM en cadmium sont généralement appliquées aux aliments les plus contaminés (abats, mollusques bivalves), mais ce n'est pas le cas de tous ces aliments pouvant être contributeurs (ex. bulots, algues).	Pour fixer des TM dans les aliments sur une base sanitaire, il est nécessaire de tenir compte de toutes les sources d'exposition (agrégation). Pour cela, il est possible de s'appuyer sur la modélisation d'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie développée dans la présente expertise.	Réviser à la baisse les teneurs maximales de cadmium dans les aliments fortement contributeurs, de façon que leurs contributions conjointes à l'exposition n'entraînent pas un dépassement de la VTR interne. Fixer des TM en cadmium dans les aliments contributeurs pour lesquels, à l'heure actuelle, il n'en existe pas.	7.3.1.1
Information des consommateurs	Information du grand public sur la problématique du cadmium	Les principaux contributeurs à l'exposition (pommes de terre, produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), légumes) sont à la fois très consommés et constituent pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base. Ainsi, il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés qui seraient spécifiques au cadmium. Néanmoins, il y a un besoin d'information du grand public sur les effets sur la santé du cadmium, les sources et voies d'exposition au cadmium, les moyens d'action à la source, etc.	Les recommandations de santé publique liées au cadmium dans certaines denrées déjà disponibles pour les consommateurs doivent être complétées par des informations plus générales sur les effets néfastes du cadmium pour la santé et les différentes sources et voies d'exposition.	Renforcer la diffusion d'informations sur le cadmium en mobilisant différents canaux de communication afin de mieux informer le public.	7.3.1.2

Options d'action		Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
	Information sur des denrées spécifiques	Certains aliments les plus contaminés sont susceptibles de conduire à une surexposition au cadmium chez les forts consommateurs (consommation importante et/ou régulière).			
Cible 7.3.2 : réduire les apports en cadmium en agissant sur les matières fertilisantes					
Abaissement des concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés utilisés en France		Réduire les concentrations en cadmium dans les matières fertilisantes permettra de réduire la contamination des denrées alimentaires qui contribuent le plus à l'exposition au cadmium. La contribution moyenne des engrais minéraux phosphatés aux apports en cadmium dans les sols agricoles français est de 55% selon Belon et al. (2012). Pour les engrais minéraux phosphatés, plusieurs voies de mise sur le marché peuvent actuellement être empruntées par les fabricants en France. La conformité au règlement (UE) 2019/1009¹²⁷ n'est pas obligatoire et la mise sur le marché d'un produit en conformité avec le droit national ou les règles générales de libre circulation du traité sur le fonctionnement de l'UE reste possible : dans ce cas, en France, une limite en cadmium de 90 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ s'applique, dans l'attente d'un nouveau décret encadrant l'innocuité et l'efficacité des MFSC en France. Pour qu'un produit obtienne le marquage CE, la limite de 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 s'applique. Selon des études françaises, une concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés n'excédant pas 20 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ assure le respect d'un flux de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ aux conditions d'emploi de l'engrais, ainsi qu'une diminution dans le temps de la contamination en cadmium dans les sols agricoles et les denrées	Il convient de privilégier une baisse de la limite réglementaire pour réduire la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés. 2 voies de réduction de la concentration en cadmium dans les engrais ont été identifiées pour les acteurs concernés : <u>Changement de sources d'approvisionnement</u> : recourir à des roches / engrais phosphatés à faible concentration en cadmium, en tenant compte des substitutions que cela impliquerait (origine, fournisseurs) <u>Décadmiation</u> : procédés diversifiés, maturités technologiques variées ; surcoût limité et absorbable	Au regard des enjeux sanitaires, abaisser la limite réglementaire en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés de telle sorte qu'elle soit ≤ à 20 mg Cd.kg⁻¹ P₂O₅ Une analyse du marché permettrait d'identifier les différentes sources d'approvisionnement envisageables et les possibilités de recours à la décadmiation selon les fournisseurs / fabricants, ainsi que les implications techniques, socio-économiques et géopolitiques associées.	7.3.2.2

¹²⁷ Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE

Options d'action	Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
	alimentaires (Anses, 2019a, 2021 ; Carne et al., 2021, Sterckeman et al., 2018). La maîtrise des sources de contamination au niveau agricole est un enjeu stratégique pour limiter l'exposition des consommateurs, tout en soutenant une production agricole nationale durable et respectueuse des exigences sanitaires.			
Abaissement des concentrations en cadmium dans les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture utilisés en France	Il n'existe aucune base officielle de données représentatives sur la concentration en Cd dans ces MFSC.	Les valeurs proposées dans le projet de décret français « socle commun » convergent avec les limites européennes, variant entre 1,5 et 3 mg kg ⁻¹ de MS selon les catégories de produits.	Tendre vers une concentration en cadmium dans ces produits ≤ à 1 mg Cd kg ⁻¹ MS, afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd.ha ⁻¹ .an ⁻¹ (Anses, 2019a, 2021)	7.3.2.3
Incitations à la réduction de la concentration en cadmium dans les autres MAFOR	La contribution moyenne aux apports en cadmium dans les sols français est de 25% pour les effluents d'élevage, et de 5% pour les boues et composts (Belon et al., 2012). <u>Effluents d'élevage</u> : les concentrations en cadmium ne font l'objet d'aucune réglementation (actuellement ou dans le projet de décret « socle commun ») : c'est une lacune importante. <u>Boues de STEP et cendres</u> : il n'a pas été identifié de base de données représentative rendant compte de leurs concentrations en cadmium. Des dépassements des limites en ETM ont déjà été constatés par la DGCCRF (ex. MIATE, 2016) - Il existe des travaux scientifiques sur des techniques de remédiation des ETM.	Réduire les concentrations en cadmium dans les MAFOR est un objectif indispensable dans un contexte de politiques publiques encourageant l'utilisation des MAFOR dans une logique d'économie circulaire.	Tendre vers une concentration en cadmium ≤ à 1 mg Cd kg ⁻¹ MS dans les fertilisants d'origine organique afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha ⁻¹ an ⁻¹ Entreprendre une réflexion sur : - Les modalités d'analyse possibles des effluents d'élevage à l'échelle des exploitations - La teneur en cadmium dans les aliments du bétail et leur devenir - L'applicabilité de techniques de remédiation des ETM dans les eaux usées	7.3.2.4
Cible 7.3.3 : évolution des pratiques agricoles				
	L'exploitation agricole n'est pas soumise à une analyse de sols : certaines informations sur la qualité du sol ne	Il y a un besoin d'information, de formation et d'accompagnement des	Etendre l'exigence de caractérisation de la concentration en cadmium dans les parcelles agricoles et de	

Options d'action	Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
Analyses de sols et abaissement du flux d'apport en cadmium dans les sols agricoles	sont pas connues par les agriculteurs (fonds géochimique naturel, pollutions anciennes). Le respect de concentrations maximales en cadmium dans le sol n'est exigé que pour l'épandage des boues de STEP, digestats de méthanisation et cendres. Des travaux indiquent la nécessité d'un flux annuel d'apport en cadmium n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole, afin de maîtriser la contamination des sols, des productions agricoles, et l'exposition alimentaire associée (Anses, 2019a, 2021). Les pratiques immobilisant les polluants (ex. chaulage, apport de matières organiques, phytostabilisation) ne constituent pas une solution durable et pérenne, et ne peuvent se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles : les agriculteurs ne devraient pouvoir accéder qu'à des MFSC de qualité adéquate (cf. 7.3.2). Les engrais minéraux phosphatés sont aussi utilisables en AB (ex. phosphate naturel tendre). Sauf à reconsidérer le cahier des charges de l'AB, celle-ci est potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium dans les matières fertilisantes et la roche phosphatée commercialisées.	agriculteurs et acteurs du conseil agricole sur la problématique du cadmium et sur les options d'action associés à leurs pratiques (ex. analyses de sols, apports de fertilisants au plus près des besoins, pratiques agro-environnementales permettant de remobiliser le phosphore stocké dans les sols).	respect de concentrations maximales, à déterminer dans le cadre de futurs travaux, avant l'épandage de toutes matières fertilisantes. Fixer un flux annuel n'excédant pas 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole. Promouvoir la pratique d'une fertilisation au plus près des besoins, notamment par des taux d'application et des choix de fertilisant tenant compte des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées, au moyen d'outils adaptés. Assurer une formation / information / accompagnement des agriculteurs et acteurs du conseil agricole sur la problématique du cadmium. Ces évolutions iraient dans le sens de la proposition de nouvelle Directive sur la surveillance des sols, récemment adoptée par le Conseil de l'UE et ayant fait l'objet d'un accord avec le Parlement européen plus tôt en 2025.	7.3.3
Cible 7.3.4 : amélioration du contrôle et de la surveillance des denrées alimentaires et des intrants et pratiques agricoles				
	La DGAI définit annuellement un dispositif de surveillance à mettre en œuvre et complété par des instructions techniques sectorielles.	La réglementation européenne actuelle en matière d'échantillonnage laisse peu de marge de manœuvre aux	Renforcer la surveillance et le contrôle du cadmium en ciblant les aliments les plus contributeurs à l'exposition :	

Options d'action	Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
Améliorer le contrôle et la surveillance des denrées alimentaires sur le Cd	Les résultats de la modélisation de l'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie (chapitre 5) indiquent que par l'alimentation, les contributions majeures sont des pommes de terre, des produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes.	autorités nationales pour ajuster la stratégie de prélèvement en considérant tous les enjeux sanitaires.	- en tenant compte de la contamination issue des sources diffuses, en particulier en lien avec l'usage de MFSC (cf. ligne suivante). - en renforçant la surveillance des produits particulièrement contributeurs à destination des enfants et très jeunes enfants.	7.3.4.1
Améliorer le contrôle et la surveillance des intrants / des pratiques agricoles sur le cadmium	Des plans de surveillance et de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture conduits en France par la DGCCRF ces dernières années indiquent qu'une part non-négligeable des MFSC présentent des non-conformités, y compris en matière de composition et d'innocuité des produits. L'information spécifique au cadmium n'a pas été identifiée. Aucune base officielle de données représentatives sur les concentrations en cadmium dans les MFSC en France n'a été identifiée.	Il y a un besoin d'articulation de la surveillance et du contrôle du cadmium dans les denrées alimentaires (cf. ligne précédente) avec la surveillance et le contrôle des intrants et pratiques agricoles qui en sont à l'origine.	Entreprendre une réflexion sur l'articulation des PSPC des intrants et pratiques agricoles avec les PSPC des denrées alimentaires (voir ligne ci-dessus). Prendre en considération les ETM dans les sols (dont le cadmium) dans l'établissement prochain des critères relatifs à la qualité et la résilience des sols prévus dans le cadre de la proposition de Directive Européenne sur le sujet.	7.3.4.2
Cible 7.3.5 : réduire l'exposition au Cd liée aux produits du tabac				
Lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif	La nocivité du tabac n'étant plus à démontrer, les autorités publiques ont une volonté d'aller vers un arrêt du tabagisme. La seule recommandation de santé publique en la matière consiste à dissuader les individus de fumer et/ou à les encourager à réduire et arrêter de fumer au plus tôt en raison de l'exposition aux multiples substances toxiques. Il n'a pas été identifié de mesure réglementaire ou de norme en vigueur spécifique au cadmium dans les produits du tabac à fumer.	Il existe un vaste panel de mesures recommandées ou mises en place par les pouvoirs publics dans le cadre de la lutte anti-tabac.	Inscrire la prévention de l'exposition au cadmium par la voie tabagique dans la poursuite et le renforcement de la lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif.	7.3.5.1

Options d'action	Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
	S'agissant de prévenir l'exposition tabagique au cadmium, l'OMS (2019) recommande la « mise en œuvre de la Convention-cadre de l'OMS pour la lutte antitabac, notamment en prévoyant une protection contre l'exposition à la fumée de tabac dans les lieux de travail intérieurs, les transports publics, les lieux publics intérieurs et, le cas échéant, d'autres lieux publics ».			
Etude des implications d'une teneur maximale ou d'un niveau maximal d'émission pour le cadmium dans le tabac	Les résultats de la modélisation de l'exposition agrégée et de prédiction de la cadmiurie (chapitre 5) indiquent que le tabac est une source majeure supplémentaire d'imprégnation au cadmium pour la population générale fumeuse en France. A défaut de pouvoir quantifier la part imputable au cadmium dans le fardeau sanitaire du tabagisme, des publications scientifiques mettent en évidence des effets sanitaires néfastes dus au cadmium dans le tabac. Des organisations scientifiques (FDA, OMS) listent le cadmium dans le tabac comme une substance prioritairement préoccupante. Une teneur en cadmium réglementée dans le tabac n'aurait a priori pas de coût pour les filières de production en France, puisque le tabac est importé et qu'il ne s'agit pas d'une mesure susceptible d'occasionner une baisse de la consommation. Le Groupe d'étude de l'OMS sur la réglementation des produits du tabac (WHO TobReg) a proposé « l'utilisation de normes de performance pour imposer une réduction des concentrations de substances toxiques en identifiant les émissions moyennes ou toute autre mesure réalisable et en interdisant l'accès au marché aux marques présentant des concentrations plus élevées », considérant qu'il pourrait s'agir là « d'une première étape vers une	Il existe des moyens techniques pour réduire la teneur en cadmium dans les feuilles de tabac (production hors France). L'article 3 de la directive 2014/40/UE sur les produits du tabac comporte des teneurs d'émission maximale en nicotine, monoxyde de carbone, goudrons compte tenu de leur toxicité ou de l'effet de dépendance que ces substances engendrent : il est possible pour les Etats membres d'ajouter des substances, mais aucun précédent n'a été identifié. Des enjeux techniques, financiers, juridiques et politiques sont identifiés en lien avec la réglementation sur la composition des produits du tabac (OMS, 2023). Une vigilance serait en tous cas nécessaire pour prévenir tout	Le GT n'a pas approfondi les implications de cette option en termes de politique publique, comme il ne dispose pas de compétence sur la faisabilité juridique de l'instauration d'une teneur limite en cadmium pour le tabac.	7.3.5.2

Options d'action	Motivations (<i>impacts / besoins lorsque documentés</i>)	Implications de mise en œuvre (<i>faisabilité</i>)	Recommandations du GT, perspectives	Pour en savoir plus
	réduction progressive des émissions globales de substances toxiques » (WHO, 2018 :9).	marketing du tabac lié une telle mesure.		

8 Analyse des incertitudes

Les incertitudes¹²⁸ sont inhérentes à toute évaluation scientifique mais n'empêchent pas sa réalisation, et ouvrent des pistes d'amélioration continue. Leur identification, leur description, l'étude de leurs impacts sur les résultats sont présentées dans ce chapitre.

Le tableau ci-dessous recense les sources d'incertitudes identifiées tout au long du travail de sa planification jusqu'à la communication des résultats de l'expertise. Ces sources d'incertitude peuvent relever du contexte, de la méthode et plus rarement de la communication des résultats de l'expertise.

Pour chaque source d'incertitude, le tableau présente pour le volet de l'expertise l'origine de l'incertitude selon qu'elle soit d'ordre méthodologique, contextuel ou encore lié au résultat. Le tableau donne pour chaque source d'incertitude lorsque cela est possible sa description, son amplitude, sa direction (ex : surestimation, sous-estimation, etc...), son impact et la façon dont elle a été prise en compte, c'est-à-dire la solution proposée pour la traiter voire la réduire. Le **Tableau 32** illustre la complexité de l'approche multicritère et met en évidence les nuances indispensables qui doivent accompagner l'expression des résultats et des conclusions de l'expertise.

¹²⁸ Incertitude : « un manque ou une limite dans les connaissances disponibles pour évaluer une situation en vue d'une prise de décision » (rapport du GT MER de 2016)

Tableau 32. Tableau des incertitudes identifiées tout au long de l'expertise

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
Planification	Contexte	Cadre de la demande	Délai de réponse et ressource limitée	Le périmètre de l'expertise est limité à la population générale, sans prise en compte de l'exposition professionnelle	L'exposition professionnelle est traitée dans la tâche T.6.2 de PARC
Planification	Contexte	Cadre de la demande	Délai de réponse et ressource limitée	Les tests d'action à la source de réduction des imprégnations au cadmium n'ont pas pu être menées	Ces tests sont recommandés parmi les perspectives pour les travaux futurs
Identification des sources et voies d'exposition	Méthodologie		Les rejets et sources relatives aux activités industrielles, liées aux services, aux transports, les produits manufacturés, les déchets et leur recyclage ont été identifiés comme des sources d'apport en cadmium. Cependant, elles n'ont pas été prises en compte directement pour estimer l'exposition du fait de la disponibilité limitée et de l'hétérogénéité des données.	Ces sources peuvent engendrer la diffusion de particules (PM) contaminées dans l'air, ainsi que de poussières. Ces particules ont été prises en compte indirectement dans la modélisation de l'exposition par l'air, l'eau et le sol.	Les impacts respectifs des différentes sources n'ont pas pu être évalués.
Identification des sources et voies d'exposition	Méthodologie		Pas de prise en compte de matériaux au contact des denrées alimentaires, et des produits de consommation tels que jouets, tatouages par manque de données et complexité (diversité des jouets, données disparates)		L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé mais une sous-estimation de l'exposition agrégée est supposée
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - Contamination	Incertitudes liées aux données de contamination dans les aliments relatives aux EAT	Ces incertitudes concernent l'échantillonnage, la méthode d'analyse, les données censurées, telles que décrites dans les EAT (Anses, 2011a, 2016, 2025).	En présence de données censurées, les hypothèses de traitement testées selon l'hypothèse lowerbound (LB) et upperbound (UB) n'ont pas eu d'impact sur les résultats d'exposition. En présence de

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
					données inférieures aux limites analytiques dans l'alimentation, celles-ci ont été traitées selon l'hypothèse lowerbound (LB) dans la présente expertise.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - contamination	Incertitudes liées aux données de sol	Les incertitudes tiennent au fait que la contamination est caractérisée sur une couche de 30 cm de sol, peu représentative de l'exposition par ingestion chez l'enfant, qui concerne plus spécifiquement les premiers centimètres de sol, pour lesquels aucune donnée n'est disponible	Sous-estimation des concentrations, en partie liée aux possibles dépôts atmosphériques
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - contamination	Incertitudes liées aux données de contamination dans l'air intérieur	En l'absence de données dans l'air intérieur, les concentrations dans l'air extérieur ont été utilisées.	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - contamination	Incertitudes liées aux données de contamination dans l'air intérieur et l'air extérieur	L'évolution temporelle des concentrations en cadmium dans les particules atmosphériques de taille PM10 a été modélisée à partir de la base de données nationale de la qualité de l'air. Les études sur les particules en suspension (PM10) dans les grandes villes montrent que le cadmium y est présent, mais les données spécifiques sur les PM1 et PM2.5 sont limitées. Ces particules fines sont pourtant cruciales car elles sont plus susceptibles de contenir des métaux lourds comme le cadmium et de pénétrer profondément dans les poumons (Puisney-Dakhli et al., 2023). Faute de données sur les PM1 et PM2.5 pour le cadmium, les concentrations en cadmium	Sous-estimation

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
				dans les particules atmosphériques de taille PM10 ont été considérées.	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - contamination	Incertitudes liées aux données de contamination dans les poussières intérieures sédimentées mesurées dans les écoles, et non dans les logements	Les concentrations de cadmium dans les poussières intérieures sédimentées rapportées dans la Campagne Nationale Ecoles 1 (CNE1) de 2013-2017 (collectées dans les écoles) ont été prises en compte car ce sont les seules données disponibles.	Sous-estimation
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - contamination	Incertitudes liées aux données de contamination dans la cigarette	Il existe des limites sur la mesure du cadmium dans la cigarette liées à l'existence du « <i>filter gate</i> », microperforations dans le papier de cigarette pour tromper les machines à fumer. Les concentrations d'exposition réelles peuvent donc être différentes de celles déterminées sur les bancs de fumage (qui sous-estiment l'exposition réelle)	Sous-estimation
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - facteurs d'exposition	Incertitudes liées aux quantités d'aliments consommés dans les études INCA	Ces incertitudes concernent les biais liés au recueil des données de consommation tels que décrits dans les rapports des études INCA 2 et INCA 3 (Anses, 2010 ; 2017). Le protocole de recueil des consommations alimentaires dans INCA 2 et INCA 3 sont différents (recueil 7 jours versus carnet alimentaire 3 jours)	Ces incertitudes connues n'ont pas eu d'impact sur les résultats d'exposition.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - facteurs d'exposition	Incertitudes liées à la durée de l'exposition à la poussière domestique et à la fraction de la surface corporelle exposée à l'air et à la poussière	Le temps d'exposition à la poussière domestique estimée à 24 heures est issue de Hermant et al. 2018. La fraction de la surface corporelle exposée à l'air et à la poussière est issue de <i>l'Exposure Factors Handbook</i> , édition 2011 (US EPA 2011) qui propose une valeur ponctuelle par sexe. Les incertitudes portent sur la durée d'exposition longue, et le besoin de données françaises et européennes sur la fraction de la surface corporelle exposée	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés aux produits cosmétiques	Parmi la diversité des produits cosmétiques disponibles sur le marché, seule une sélection restreinte a été prise en compte, en fonction de la disponibilité des données de consommation et de contamination, souvent limitées. Cette sélection incomplète engendre un biais potentiel, d'autant plus marqué que, pour certains produits pourtant largement consommés, aucune donnée de contamination n'est actuellement disponible. Par ailleurs, les poudres ont été exclues de l'analyse, malgré la possibilité d'exposition par voie respiratoire, en raison de leur composition complexe et évolutive.	Ces limitations sont susceptibles de conduire à une sous-estimation de l'exposition.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés aux produits cosmétiques	Incertitudes sur les quantités quotidiennes de produits cosmétiques utilisés. Les données considérées ne tiennent pas compte de la population infantile des moins de 3 ans. Pour les 4-14 ans, seules les données pour la population féminine ont été prises en compte. La fréquence de consommation est tirée d'une étude européenne intégrant 4 pays (France, Allemagne, Espagne, UK – donc pas seulement national)	Ces limitations sont susceptibles de conduire à une sous-estimation de l'exposition.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée – facteurs d'exposition	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés au tabac	Non prise en compte du tabagisme passif, ultra-passif ¹²⁹ (tabagisme tertiaire pouvant affecter particulièrement les enfants), et autres modes de consommation du tabac (tabac à mâcher, etc) par manque de données.	L'impact sur l'exposition peut être sous-estimée, notamment pour les enfants.
Agrégation des sources et voies d'exposition,	Méthodologie	Données d'entrée –	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés au tabac	Non prise en compte des produits de contrefaçon. Selon un rapport de Santé Publique France et de l'OFDT	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.

¹²⁹ Le tabagisme ultra-passif, appelé également tabagisme tertiaire, repose sur l'inhalation des microparticules de fumée incrustées et piégées dans la maison ou dans tous lieux fermés ayant reçu des fumeurs

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
prédiction de la cadmiurie		facteurs d'exposition		(2024), le marché parallèle de tabac est estimé par des organismes publics entre 10 et 20%,	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée – facteurs d'exposition	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés au tabac	Pratiques liées au tabagisme : il demeure des incertitudes en matière de pratiques (cigarettes avec filtre, sans filtre, roulées, tabac à mâcher, autres modes de consommation)	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - facteurs d'exposition	Incertitudes concernant les facteurs d'exposition liés au tabac et produits connexes	Non prise en compte des produits de vapotage par manque de données ; les matériaux des dispositifs de vapotage pouvant constituer une source de cadmium.	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - exposition	Incertitudes concernant l'exposition au tabagisme	Les trajectoires d'exposition au tabagisme considérées ne prennent pas en compte l'historique complet de consommation des fumeurs, notamment les périodes d'arrêt et de reprise du tabagisme, ou l'alternance entre cigarette classique et produits de vapotage. En conséquence, seuls les fumeurs actuels et les anciens fumeurs sont pris en compte, avec, respectivement, l'ancienneté du tabagisme pour les premiers et la seule période tabagique passée pour les seconds.	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée - exposition	Incertitudes concernant l'exposition aux poussières par ingestion, s'appuyant sur des mesures dans les écoles et non dans les logements	Les données sont issues de 300 écoles pour la concentration dans les poussières et la quantité de poussières ingérée selon US-EPA 2011-2017. L'exposition est calculée en tirant des données relatives à la quantité de poussière ingérée et la contamination des poussières. Les incertitudes portent sur la nécessité d'utiliser des mesures de quantités de poussières ingérées plus récentes, et une régionalisation pour la concentration en Cd dans les poussières (zone urbaine vs rurale)	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Données d'entrée exposition	Non prise en compte de tous les produits de la mer.	L'étude Consomer conduite entre 2016 et 2017 permet de collecter des données sur la consommation de produits de la mer au sein de la population adulte résidant dans les départements côtiers français. Néanmoins, il a été difficile d'apparier ces données dans le modèle d'exposition agrégée par manque de données de contamination <i>via</i> les EAT, sans capacité à tenir compte des habitudes de consommation alimentaires différentes pour les consommateurs des produits de la mer avec des aliments moins consommés que d'autres, engendrant des incertitudes dans la modélisation.	L'exposition au Cd suite à la consommation de produits de la mer est sous-estimée dans le modèle.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Périmètre	Pas de prise en compte de la biodisponibilité du cadmium	La biodisponibilité du cadmium en fonction des différentes matrices d'exposition (alimentation, eau, air, sol, poussières) n'a pas été prise en compte dans l'évaluation. En l'absence de données disponibles sur la spéciation du cadmium ou sur les phases porteuses dans ces milieux, une estimation différenciée de l'absorption réelle n'a pu être réalisée.	Cette limite est susceptible d'induire une surestimation ou une sous-estimation de l'exposition selon les contextes.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Agrégation	Agrégation des sources et voies d'exposition	Les facteurs d'exposition dans l'agrégation des sources et voies d'exposition ont été considérées indépendantes dans le modèle. Une hypothèse d'additivité des doses résultant des différentes sources et voies d'exposition a été menée dans la méthodologie.	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Agrégation	Données issues de diverses enquêtes	L'agrégation des expositions nécessite de combiner les expositions précédemment calculées par source. Le modèle combine des données issues d'enquêtes distinctes, portant sur des individus de différentes populations, avec des temporalités et des méthodes de quantification différentes. La méthode proposée par Vanacker et al. (2020), basée sur des simulations Monte-Carlo à deux dimensions a été	La méthode d'agrégation par stratification utilisée permet de réduire les erreurs lors de l'agrégation des sources et voies d'exposition. L'incertitude liée à la combinaison de donnée a été quantifiée, celle-ci est faible.

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
				utilisée. Cette méthode s'appuie sur la définition d'une population de référence représentative de la population cible, ainsi que des variables de stratification ayant un impact potentiel sur les différentes sources d'expositions.	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Population des enfants	Les paramètres physiologiques tels que le poids corporel, les volumes d'organes ou l'excrétion urinaire de la créatinine sont estimés en fonction de l'âge. Néanmoins, d'autres changements dans la cinétique du cadmium avec l'âge peuvent se produire. La distribution des taux de transfert entre compartiments ne prend pas nécessairement en compte une population d'enfants et n'est pas spécifique de cette tranche d'âge.	Même si le modèle a été validé dans un contexte d'exposition tout au long de la vie, les prévisions pour la population des enfants sont à considérer avec prudence.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Croissance des paramètres physiologiques du modèle PBK	Les équations déterministes fonction de l'âge et du sexe proposées dans Gastellu et al. 2025 sont utilisées pour modéliser la trajectoire moyenne des organes, et tissus au cours du temps.	La croissance est bien considérée d'un point de vue physiologique
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Variabilité inter-individuelle des paramètres physiologiques du modèle PBK	Retrait des coefficients de variabilité utilisés pour le poids des organes dans Gastellu et al. 2025 qui ne permettent pas de tenir compte de la corrélation entre les organes. Remplacement par le rapport entre le poids observé à l'âge de référence de l'étude Esteban et le poids moyen calculé. Ce rapport est utilisé pour chaque individu pour tracer sa trajectoire de poids corporel, en multipliant la trajectoire déterministe moyenne par le rapport. Le poids des autres organes étant calculé à partir du poids corporel, l'âge et le sexe, la variabilité inter-individuelle précédente est automatiquement intégrée pour les autres organes et permet de garder la corrélation entre les poids des différents organes.	Cela permet de garder la corrélation entre les organes et un poids corporel plus réaliste.

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Variabilité toxicocinétique inter-individuelle	Les paramètres cinétiques sont tirés de lois de distribution de type triangulaire (variabilité inter-individuelle) et sont considérés comme constants pour un individu.	Les paramètres étant constant pour un individu donné, la variabilité intra-individuelle n'a pas été considérée.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Incertainité liée aux paramètres PBK	Pour la plupart des paramètres, l'incertitude liée aux choix des valeurs/distributions utilisées n'est pas distinguée de celle liée à la variabilité interindividuelle : seule la résultante des deux est observée dans les sorties du modèle.	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Intégration de l'exposition <i>via</i> la voie cutanée	Un facteur d'absorption de 0,5% est appliqué à la quantité d'exposition cutanée et distribuée dans le plasma. Ce facteur a été estimé à partir des résultats de l'étude de Wester et al. 1992, reprise dans ATSDR 2012. Cette étude utilisait des cellules de peau humaine (<i>in vitro</i>), et montrait que 0,1 à 0,6% du cadmium dans l'eau (chlorure de cadmium) passait dans le plasma après 16h de perfusion. Cette étude montrait également que lorsqu'un sol contaminé par du cadmium (13 ppb de chlorure de cadmium) était appliquée sur la surface de la peau, les niveaux de Cd plasmatiques variaient de 0,02 à 0,07% de la dose appliquée.	Ce facteur d'absorption étant 10 fois inférieur à celui observé en milieu liquide, la valeur de 0,5% proposée permet d'être conservatrice selon le type de contact cutané modélisé.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Exposition <i>in utero</i>	L'exposition au cadmium avant la naissance a été modélisée, en l'absence de modèle placentaire, à partir d'une distribution lognormale ajustée sur les données de concentration massique de cadmium dans le sang de cordon ombilical.	Cette prise en compte permet d'évaluer l'exposition de manière protectrice en incluant l'exposition prénatale au cadmium

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
				Il a été fait l'hypothèse selon laquelle la concentration massique de cadmium dans le sang de cordon est égale à la concentration massique dans le sang à la naissance. Un modèle cinétique du cadmium <i>in utero</i> serait à développer.	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Modèle PBK	Trajectoire de vie	Non prise en compte de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués.	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	VTR interne	Un niveau de confiance global moyen-fort a été attribué à cette VTR lors de l'expertise de l'Anses (2017). Le niveau de confiance global a été attribué à cette VTR en se basant sur les critères suivants : • Niveau de confiance de la base de données : fort • Niveau de confiance dans le choix de l'effet critique et le mode d'action : moyen. La toxicité du cadmium sur l'os est établie, mais elle est encore peu documentée. Le mode d'action aux faibles doses n'est pas complètement élucidé. • Niveau de confiance dans le choix de l'étude clé : fort. Les études épidémiologiques d'Engström et al. (2011 et 2012) sont très détaillées et bien argumentées. Elles ont été jugées robustes par les experts. • Niveau de confiance dans le choix de la dose critique : moyen.	N'ayant pas accès aux données individuelles, il n'a pas été possible de dériver une BMD à partir des études épidémiologiques d'Engström et al. (2011 et 2012).	La VTR interne de 0,5 µg Cd.g ⁻¹ de créatinine (Anses, 2019a) est la valeur la plus récente et robuste, quelles que soient les voies d'exposition pour la population générale (qui comprend des fumeurs et non-fumeurs).

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Méthodologie	Valeurs repères biologiques	L'Anses (2017) a dérivé des valeurs sanitaires repères du cadmium urinaire (en $\mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine en fonction de l'âge) appelées valeurs repères biologiques, présentées en annexe 7 de son rapport (Anses, 2017). Ce sont des valeurs estimées à ne pas dépasser afin de respecter la VTR interne de $0,5 \mu\text{g Cd.g}^{-1}$ de créatinine à l'âge de 60 ans	Les valeurs repères biologiques permettent de tenir compte de la cinétique du cadmium dans l'organisme et de l'évolution de la concentration urinaire limite de cadmium à ne pas dépasser, dès la naissance, afin d'éviter d'atteindre un dépassement de la VTR interne ($0,5 \mu\text{g Cd.g}^{-1}$ de créatinine) à l'âge de 60 ans.	/
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Résultats	Prédiction de la cadmiurie	Choix d'une population de référence pour les enfants de moins de 6 ans et les individus de plus de 75 ans	Les enfants de moins de 6 ans et les individus de plus de 75 ans n'étant pas inclus dans l'étude Esteban, des individus sont simulés à partir des données de l'INSEE en reproduisant la structure de la population française en termes d'âge et de sexe	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Résultats	Comparaison entre les cadmiuries prédites par le modèle intégrant trajectoires d'exposition et toxicocinétique avec celles mesurées dans l'étude Esteban	Chez les individus adultes non-fumeurs de moins de 45 ans, les cadmiuries prédites sont sous-estimées en moyenne d'environ 40%. La population des enfants (6-17 ans) présente des valeurs prédites majoritairement plus faibles (d'environ 50% en moyenne) et moins dispersées que celles mesurées, reflétant une sous-estimation des expositions et de leur variabilité entre individus.	Une telle sous-estimation a déjà été mentionnée dans la littérature pour ce type de modèle (Béchaux et al. 2014 ; Vanacker et al. 2020, Lamon et al. 2025). Plusieurs incertitudes peuvent expliquer cette sous-estimation des expositions par le modèle. D'une part, le modèle combine des données issues d'enquêtes distinctes, portant sur des individus de différentes populations, avec des temporalités et des méthodes de quantification différentes. D'autre part, les cadmiuries prédites ont été ensuite comparées à celles observées dans la population de l'étude Esteban, également différentes. Ainsi, le modèle ne peut donc reproduire finement les imprégnations. De plus, certaines sources d'exposition au cadmium n'ont pu être intégrées, faute de données ou d'identification, telles que le tabagisme passif, certains produits cosmétiques, les matériaux en contact avec les	Pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs prédites par le modèle sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés.

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
				denrées alimentaires, ou encore les activités professionnelles exposant au cadmium. Pour certains paramètres d'entrée du modèle (par exemple durée d'exposition aux poussières intérieures, nombre de cigarettes par jour), seules des valeurs ponctuelles ont pu être utilisées, limitant la caractérisation de leur variabilité. Aussi, il n'a pas été possible d'intégrer l'ensemble de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués. Il est également souligné qu'au cours de ces dernières décennies, la contamination par le cadmium a évolué (Béchaux et al. 2014). Même si le modèle de trajectoire d'exposition prend en compte plusieurs enquêtes alimentaires conduites au cours du temps et certains facteurs environnementaux (sol, poussières...), il ne peut pas reproduire parfaitement cette évolution. Pour les enfants, la sous-estimation de la cadmiurie prédite pourrait être liée à l'incertitude autour de la charge en cadmium à la naissance, ou encore à l'absence de prise en compte du tabagisme de la mère, qui n'est pas intégré dans le modèle.	
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Résultats	Identification de la proportion de la population à risque	Dès lors que certaines sources n'ont pu être prises en compte, il est probable que les cadmiuries soient globalement sous-estimées. De ce fait, la proportion des individus à risques peut être sous-estimée. Ces résultats peuvent résulter de limites liées à l'hétérogénéité des données, des limites du modèle PBK ou encore des limites liées à la dérivation des		Tout dépassement estimé des VRB indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé.

Volet de l'expertise	Origine de l'incertitude (niveau 1)	Origine de l'incertitude (niveau 2)	Description, amplitude, sens	Prise en compte	Impact
			VRB qui sont des valeurs sanitaires de référence à titre indicatif.		
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Résultats	Interprétation aliments contributeurs majeurs	La décomposition des aliments en ingrédients et le dosage du cadmium des ingrédients liés aux aliments contributeurs majeurs identifiés n'a pas pu être réalisé		Pas de recommandations à l'échelle de l'ingrédient, mais de l'aliment.
Agrégation des sources et voies d'exposition, prédiction de la cadmiurie	Résultats	Interprétation aliments contributeurs majeurs	Le rôle de l'eau de cuisson dans les aliments contributeurs majeurs n'a pas pu être étudié. Par exemple, l'impact du lavage comme sur les pommes de terre, pâtes, n'ont pu être investigués	Non pris en compte	L'impact sur l'exposition n'a pas pu être estimé
Analyse socio-économique	Méthodologie	Périmètre	Du fait du caractère multi-sources de l'exposition et multi-cibles du périmètre de l'auto-saisine, une analyse comparative, systématique et quantitative de tous les coûts et conséquences de chaque option d'action identifiée n'a pas pu être réalisée.	Dans le délai imparti mais aussi compte-tenu de l'absence inévitable de données nécessaires pour identifier, documenter, quantifier, voire monétariser ces coûts et conséquences, il est apparu plus pertinent de proposer une analyse des principales implications des options d'action, en prenant appui sur une synthèse des données quantitatives ou qualitatives disponibles. Ce travail vise ainsi à éclairer les acteurs concernés dans le choix des options d'action à mettre en place,	Imprécisions dans les coûts estimés des actions

Bien que pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs prédites par le modèle sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés, il n'a pas été identifié d'incertitudes conduisant à une surestimation.

La présente expertise a permis d'explorer de manière inédite le lien entre l'imprégnation humaine au cadmium et un nombre conséquent de voies et sources d'exposition en intégrant diverses composantes : multi-sources, multi-voies, dynamiques d'exposition pour l'ensemble de la population de la période prénatale à l'âge de 100 ans, facteurs socio-économiques. Bien que la co-exposition avec d'autres substances ne soit pas couverte dans cette expertise, cette démarche s'inspire du concept d'exposome¹³⁰ et constitue une avancée méthodologique importante. Elle permet d'évaluer pour la population générale française, adultes et enfants, l'exposition agrégée au cadmium et de modéliser la cadmiurie en fonction de l'âge des individus et ainsi d'anticiper la conséquence de mesures de gestion sur les trajectoires d'exposition. Une telle démarche pourra être transposée à d'autres contaminants. Elle a également permis d'analyser les déterminants majeurs de l'exposition humaine au cadmium et ainsi de caractériser les contributions par source et par voie d'exposition à l'imprégnation. Elle a permis aussi de tester l'utilisation de valeurs repères biologiques par classe d'âge afin de produire des indicateurs de risque par classe d'âge.

Néanmoins, adaptée à la complexité et aux incertitudes inhérentes aux données, l'approche développée dans cette expertise est un support à l'amélioration de la compréhension des sources d'exposition à l'imprégnation au cadmium et a permis d'orienter les priorités d'action.

Se doter d'une stratégie pour mesurer le succès de ces actions apparaît comme un besoin dans une optique d'ajustement des choix opérés.

¹³⁰ L'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques et physiques, en interaction avec le statut physiologique, le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception jusqu'à la fin de sa vie, afin d'expliquer son état de santé (Anses, 2023).

9 Conclusions et recommandations du groupe de travail

9.1 Conclusions : synthèse de l'expertise

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique omniprésent dans l'environnement (sols, air, eau, sédiments et la biosphère : plantes, animaux, humains). Naturellement présent dans les sols (fond géochimique), il est également présent dans l'environnement en raison de multiples activités agricoles et industrielles. La population générale est ainsi exposée à ce contaminant ubiquitaire reconnu cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction. Le cadmium est responsable, chez l'Homme, d'atteintes rénales et d'une fragilité osseuse en cas d'exposition prolongée, principalement par voie orale. Dans le contexte actuel d'une situation de forte exposition alimentaire et de forte imprégnation de la population générale française par le cadmium, l'expertise menée visait à apporter une compréhension de l'exposition globale au cadmium. Cette expertise complète les travaux précédemment menés sur le cadmium à l'Anses et les analyses issues des études de l'alimentation totale (EAT).

9.1.1 Une avancée méthodologique reliant les différentes voies et sources d'exposition avec l'imprégnation humaine

La présente expertise a permis d'explorer de manière inédite le lien entre l'imprégnation humaine au cadmium et un nombre conséquent de voies et sources d'exposition en intégrant diverses composantes : multi-sources, multi-voies, dynamiques d'exposition pour l'ensemble de la population de la période prénatale à l'âge de 100 ans, facteurs socio-économiques. Bien que la co-exposition avec d'autres substances ne soit pas couverte dans cette expertise, cette démarche s'inspire du concept d'exposome¹³¹ et constitue une avancée méthodologique importante. Elle permet d'évaluer pour la population générale française, adultes et enfants, l'exposition agrégée au cadmium et de modéliser la cadmiurie en fonction de l'âge des individus et ainsi d'anticiper la conséquence de mesures de gestion sur les trajectoires d'exposition. Une telle démarche pourra être transposée à d'autres contaminants. Elle a également permis d'analyser les déterminants majeurs de l'exposition humaine au cadmium et ainsi de caractériser les contributions par source et par voie d'exposition à l'imprégnation. Elle a permis aussi de tester l'utilisation de valeurs repères biologiques par classe d'âge afin de produire des indicateurs de risque par classe d'âge.

La comparaison entre les cadmiuries prédites par le modèle intégrant trajectoires d'exposition et toxicocinétique avec celles mesurées dans l'étude Esteban (cf figures 16, 17, 18, 19 et tableaux 11 et 12 du chapitre 5 dans le rapport), montre que le meilleur niveau de concordance entre les expositions prédites et observées est obtenu pour les classes d'âge 45-64 ans dans la population générale française non-fumeuse et fumeuse, et pour les 65-79 ans chez les fumeurs. Cependant, chez les individus adultes non-fumeurs de moins de 45 ans, les cadmiuries prédites sont sous-estimées en moyenne d'environ 40%. La population des enfants

¹³¹ L'exposome correspond à la totalité des expositions néfastes comme bénéfiques à des agents chimiques, biologiques et physiques, en interaction avec le statut physiologique, le milieu de vie et le contexte psycho-social, que connaît un organisme vivant de sa conception jusqu'à la fin de sa vie, afin d'expliquer son état de santé (Anses, 2023).

(6-17 ans) présente des valeurs prédites majoritairement plus faibles (d'environ 50% en moyenne) et moins dispersées que celles mesurées, reflétant une sous-estimation des expositions et de leur variabilité entre individus. Une telle sous-estimation a déjà été mentionnée dans la littérature pour ce type de modèle (Béchaux et al. 2014 ; Vanacker et al. 2020, Lamon et al. 2025). Plusieurs incertitudes peuvent expliquer cette sous-estimation des expositions par le modèle. D'une part, le modèle combine des données issues d'enquêtes distinctes, portant sur des individus de différentes populations, avec des temporalités et des méthodes de quantification différentes. D'autre part, les cadmiuries prédites ont été ensuite comparées à celles observées dans la population de l'étude Esteban, également différentes. Ainsi, le modèle ne peut donc reproduire finement les imprégnations. De plus, certaines sources d'exposition au cadmium n'ont pu être intégrées, faute de données ou d'identification, telles que le tabagisme passif, certains produits cosmétiques, les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, ou encore les activités professionnelles exposant au cadmium pour les adultes. Pour certains paramètres d'entrée du modèle (par exemple durée d'exposition aux poussières intérieures, nombre de cigarettes par jour), seules des valeurs ponctuelles ont pu être utilisées, limitant la caractérisation de leur variabilité. Aussi, il n'a pas été possible d'intégrer l'ensemble de la variabilité des parcours de vie, tels que l'évolution des habitudes alimentaires, les changements de lieu de résidence ou l'exposition liée à la proximité de sites pollués. Il est également souligné qu'au cours de ces dernières décennies, la contamination par le cadmium a évolué (Béchaux et al. 2014). Même si le modèle de trajectoire d'exposition prend en compte plusieurs enquêtes alimentaires conduites au cours du temps et certains facteurs environnementaux (sol, poussières...), il ne peut pas reproduire parfaitement cette évolution.

Pour les enfants, la sous-estimation de la cadmiurie prédite pourrait être liée à l'incertitude autour de la charge en cadmium à la naissance, ou encore à l'absence de prise en compte du tabagisme de la mère, qui n'est pas intégré dans le modèle.

D'autres incertitudes, décrites dans le chapitre 8 du rapport et liées au manque de connaissances et de données, peuvent également expliquer les écarts observés entre les cadmiuries prédites et mesurées dans la population de l'étude Esteban. Dans le futur, certaines de ces incertitudes pourraient être réduites et la variabilité mieux caractérisée.

In fine, les résultats indiquent une bonne adéquation entre les distributions d'expositions prédites et observées des individus fumeurs de plus de 45 ans. Pour les individus de moins de 45 ans, les valeurs prédites par le modèle sous-estiment et correspondent aux bornes inférieures des niveaux observés.

Néanmoins, adaptée à la complexité et aux incertitudes inhérentes aux données, l'approche développée dans cette expertise est un support à l'amélioration de la compréhension des sources d'exposition à l'imprégnation au cadmium et a permis d'orienter les priorités d'action.

La présente expertise se distingue par sa position à l'interface entre une expertise motivée par une problématique de santé publique, et une démarche de recherche menée dans le cadre du partenariat européen PARC où elle constitue un cas d'étude pour la co-construction d'une méthode d'évaluation de l'exposition agrégée.

9.1.2 Situation de risque sanitaire lié au cadmium : l'alimentation comme source d'exposition principale

Les résultats en **Figure 20**, **Figure 21**, **Figure 22** présentent sous forme d'histogramme en 2025 la cadmiurie moyenne prédite en $\mu\text{g Cd g}^{-1}$ de créatinine par classe d'âge, le pourcentage de contribution des couples source-voie d'exposition, pour respectivement la population générale non fumeuse, les enfants de moins de 12 mois, et la population générale fumeuse. Les VRB par classe d'âge (représentées par la ligne en tiret), de façon à ne pas dépasser la VTR interne à l'âge de 60 ans (représentée en trait plein), permettent d'observer que dès la naissance, les imprégnations moyennes simulées à partir de différentes sources et voies d'exposition dépassent la VRB. Pour rappel, les résultats modélisés sous-estiment la cadmiurie. Cette comparaison indique à l'échelle populationnelle une possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé.

Les résultats montrent une cadmiurie augmentant avec l'âge de la population, en lien avec le potentiel bioaccumulable du cadmium et la chronicité des expositions actuelles sur la vie entière. Ils indiquent qu'une part de la population est à risque, avec une imprégnation au cadmium préoccupante à tout âge et cela dès le plus jeune âge.

Les cadmiuries estimées par tranche d'âge en 2025 présentent des niveaux dépassant les VRB fixées par classe d'âge, pour une fraction de la population française fumeuse et non fumeuse, dont les nourrissons (à titre indicatif : de 33% des 0-3 mois à 100% pour les 25-36 mois) et les adultes (49 % des 18-44 ans, 59% des 45-64 ans et 54 % des 65-79 ans) (cf. tableaux 13, 14 et 15 dans le chapitre 5 du rapport). Aux niveaux d'exposition actuels, et s'ils se maintiennent dans le temps, de tels dépassements indiquent, à l'échelle populationnelle, la possibilité d'apparition d'effets néfastes pour la santé. Ces résultats du modèle confirment et complètent les mesures précédemment obtenues dans les évaluations de l'Anses effectuées à partir des expositions alimentaires des EAT qui concluent à l'existence d'un risque lié à l'exposition au cadmium dans une partie de la population. Ces résultats confortent également ceux de Santé publique France relatifs aux imprégnations mesurées dans l'étude Esteban qui montrent des dépassements de valeurs guides sanitaires pour près de la moitié de la population adulte française. Il en ressort une nécessité de prioriser des options d'action pour limiter l'imprégnation humaine au cadmium, en particulier au regard de son accumulation dans l'organisme au cours de la vie.

Cette expertise confirme que l'alimentation est la source majeure de l'imprégnation humaine au cadmium tout au long de la vie pour la population générale.

Chez les enfants de moins de 12 mois, l'exposition provient majoritairement de l'ingestion d'aliments, bien que d'autres sources minoritaires participent également à l'imprégnation, notamment l'ingestion de poussières et de sols. L'exposition prénatale au cadmium — bien que partiellement limitée par la barrière placentaire — se poursuit *post partum* ; l'imprégnation est significative pendant les six premiers mois de vie. Cette exposition prénatale explique jusqu'à 40% de l'imprégnation observée sur les trois premiers mois de vie, et diminue à 24% entre 3 et 6 mois, du fait de l'exposition à de nouvelles sources. L'exposition prénatale constitue une fenêtre de sensibilité particulière vis à vis des effets sur le développement (Anses, 2019a).

Chez les enfants âgés de plus de 12 mois jusqu'à 17 ans et les adultes non-fumeurs, l'alimentation est la source majeure, expliquant jusqu'à 98 % de l'imprégnation au cadmium.

Chez les fumeurs, l'inhalation de fumée de tabac est une autre source importante d'exposition. La source tabagique contribue à l'imprégnation particulièrement pour les individus à partir de la quarantaine. Chez les 45-64 ans, elle peut représenter jusqu'à 43 % de l'imprégnation,

tandis que l'alimentation reste la principale source avec une contribution allant jusqu'à 55 %. En tenant compte de leur consommation tabagique actuelle et(ou) passée et sans considérer le tabagisme passif, une cadmiurie plus élevée est observée chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs, avec des niveaux presque doublés à partir de 45 ans. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude Esteban (Oleko et al. 2021), qui rapportent une imprégnation augmentée de 53,6 % chez les fumeurs par rapport aux non-fumeurs. Il est de plus observé que la proportion d'individus dépassant les VRB par classe d'âge chez les fumeurs est plus élevée que dans la population générale non-fumeuse, soit 71 % pour les 18-44 ans et 76 % pour les 45-64 ans chez les fumeurs, contre 29 % pour les 18-44 ans et 42% pour les 45-64 ans chez les non-fumeurs (cf. tableaux 13, 14 et 15 dans le chapitre 5 du rapport). Le tabagisme est confirmé comme un facteur d'exposition aggravant, augmentant la cadmiurie et favorisant le dépassement des VRB.

Une analyse plus détaillée des groupes d'aliments les plus contributeurs à l'imprégnation a été effectuée.

La contribution moyenne des groupes d'aliments à l'imprégnation humaine au cadmium, par classe d'âge pour la population générale française, est illustrée en Figure 9.

Avant l'âge de 7 mois, les préparations infantiles de 1^{er} âge constituent la principale source alimentaire à l'imprégnation humaine au cadmium, suivies des céréales infantiles.

Chez les enfants de 7 à 12 mois, les pots de légumes s'ajoutent aux contributions des préparations infantiles et céréales infantiles.

Chez les enfants de 13 à 24 mois, les pots de légumes-viande et les pots de légumes représentent des contributeurs importants, auxquels s'ajoutent progressivement les pommes de terre et autres légumes.

Chez les enfants de 3 à 5 ans, la contribution des aliments courants à l'imprégnation humaine au cadmium augmente nettement, avec un rôle majeur des pommes de terre, puis des légumes, des produits céréaliers (pâtes/riz/blé raffinés), des soupes et bouillons ainsi que des viennoiseries/pâtisseries/gâteaux/biscuits.

À partir de 6 ans jusqu'à 18 ans et à l'âge adulte : les pains et produits de panification sèche, les pommes de terre, les légumes, les pâtes/riz/blé raffinés et autres produits céréaliers raffinés, ainsi que les viennoiseries/pâtisseries/gâteaux/biscuits sont des contributeurs majeurs, représentant pour plus de la moitié de l'exposition par voie alimentaire à l'imprégnation humaine au cadmium.

Il est noté que la concentration en cadmium a augmenté pour 28 % des aliments, dans l'EAT3 par rapport à l'EAT2 notamment pour les pommes de terre et certains produits céréaliers, en particulier pour les céréales pour petit déjeuner avec une augmentation d'un facteur 3,5 (Anses, 2026).

Les résultats de la présente expertise indiquent que, chez l'enfant à partir de 5 ans comme chez l'adulte, la contribution de la catégorie « chocolat et confiserie » ne dépasse pas 3 % de l'exposition totale de l'alimentation. La **Figure 24** l'illustre ; elle présente la part (en %) des groupes de denrées constituant la catégorie « Autres groupes d'aliments » de la **Figure 23**, chacun expliquant moins de 5 % de l'imprégnation par classe d'âge dans la population, catégorie au sein de laquelle figure le chocolat.

Les experts ont toutefois pris note de l'attention portée par les instances internationales concernant la contamination du cacao par le cadmium (JECFA, 2023). La contribution du cacao en tant qu'ingrédient dans les produits à base de chocolat n'a pas pu être calculée, faute de données scientifiques appropriées. Il conviendrait de mener par la suite des travaux complémentaires sur la contribution totale des produits à base de chocolat à l'exposition.

9.1.3 Cinq cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium

L'alimentation et le tabagisme étant identifiés dans cette expertise comme les principales sources de l'imprégnation humaine, ces deux domaines ont été retenus pour une analyse approfondie des cibles et options d'action d'intérêt à l'aide d'une analyse socio-économique.

Concernant l'exposition au cadmium par l'alimentation, les contributions majeures sont des pommes de terre, des produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes. Ces aliments sont à la fois très consommés et constituent pour une partie de la population des denrées du régime alimentaire de base. De fait, la réduction de l'exposition dès le plus jeune âge repose avant tout sur des actions visant à réduire les sources de contamination des aliments identifiés comme contributeurs au cours de la vie, la contamination des denrées étant directement liée à la présence de cadmium dans les sols.

Ainsi il n'est pas pertinent de formuler des recommandations en termes de choix individuels et de fréquence de consommation des aliments concernés, qui seraient spécifiques au cadmium.

L'impact des émissions industrielles, liées aux services, aux transports, aux produits manufacturés, aux déchets et leur recyclage sur l'exposition au cadmium de la population générale est considéré dans la présente expertise au regard de l'exposition à l'air, l'eau et les sols. D'une part, les résultats indiquent qu'il s'agit de sources mineures à l'imprégnation humaine au cadmium (contribution < 2%) lorsque considérées *via* l'exposition par l'air et les poussières par les voies d'inhalation, d'ingestion et de contact cutané, après agrégation de toutes sources et voies d'exposition confondues pour la population générale fumeuse et non-fumeuse, hors milieu professionnel (cf. chapitre 5 du rapport). D'autre part, un flux d'apport en cadmium plus faible dans les sols agricoles par les dépôts atmosphériques (14%) a été constaté dans de précédents travaux comparativement aux intrants agricoles (>80%) (cf. chapitre 4 du rapport, Belon et al. 2012 ; Anses, 2019a). Par ailleurs, il est constaté dans la littérature une réduction en France des émissions industrielles de cadmium dans les écosystèmes durant la dernière décennie, avec une diminution des émissions industrielles dans l'air et dans l'eau, respectivement de 48 % et 69 % en 10 ans. L'étude des options d'action spécifiquement dédiées aux émissions industrielles générant une problématique spécifique des sites et sols pollués n'est pas approfondie dans cette expertise (cf. chapitre 6 du rapport). En effet, ces émissions font ou doivent faire l'objet, selon les situations, de mesures spécifiques ciblées.

En revanche, la contamination des sols agricoles, elle-même influencée par l'usage d'intrants, et par les pratiques agricoles, a été retenue comme un domaine d'action possible (cf. chapitre 6 du rapport).

Les actions visant à réduire les apports de cadmium aux sols agricoles permettraient de diminuer la contamination des principaux aliments contributeurs à l'exposition humaine et celle des denrées susceptibles d'être cultivées sur ces sols contaminés.

In fine, à partir de ces trois domaines (intrants et pratiques agricoles, alimentation et tabagisme), cinq cibles d'action, ont été identifiées (**Figure 33**) :

- la réduction de l'exposition du consommateur par la voie alimentaire (contamination des aliments) ;
- la réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes ;
- l'évolution des pratiques agricoles ;

- l'amélioration du contrôle et de la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires ;
- la réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique.

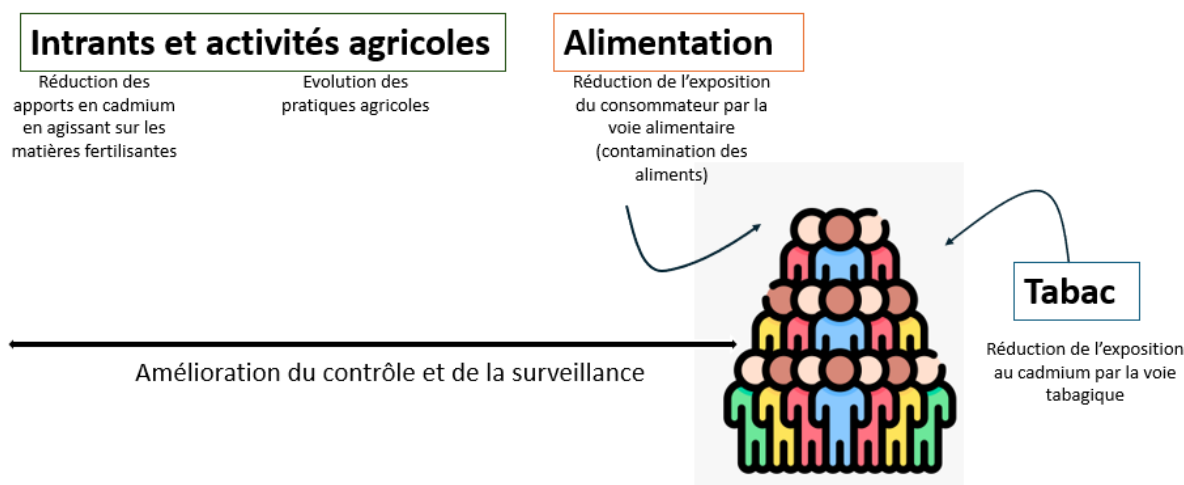


Figure 33. Domaines et cibles d'action d'intérêt pour réduire l'imprégnation au cadmium de la population française

Pour ces différentes cibles, a été menée une analyse des options d'action sur les sources et voies d'exposition de la population, en tenant compte des enjeux associés à leur mise en œuvre.

Les constats et recommandations qui en découlent sont présentés dans le tableau de synthèse du chapitre 7 du rapport accompagnant le présent avis. Il reprend les conclusions relatives aux cinq cibles d'action analysées.

L'évaluation de l'exposition globale au cadmium de la population générale et l'analyse ciblée de différentes options ont constitué un appui pour retenir et recommander des leviers d'action pour réduire l'imprégnation humaine au cadmium, priorisés dans la section suivante.

9.2 Recommandations de leviers d'action prioritaires pour réduire l'imprégnation humaine au cadmium

Les cinq cibles d'action identifiées comme particulièrement pertinentes ont fait l'objet d'une analyse ayant conduit à la priorisation de leviers d'action. Les experts formulent cinq recommandations d'actions priorisées selon une temporalité court, moyen terme et continue, ainsi que couvrant l'ensemble du continuum, depuis la source jusqu'à l'exposition alimentaire et tabagique :

- action à court-terme : réduire les apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes ;
- action à court-terme : promouvoir une évolution des pratiques agricoles ;
- action à moyen-terme : réduire la contamination en cadmium des aliments ;
- action continue : améliorer le contrôle et la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments ;
- action continue : réduire l'exposition liée au tabagisme.

9.2.1 Action à court-terme : réduire les apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes

La maîtrise des sources de contamination au niveau agricole est un enjeu stratégique pour limiter l'exposition des consommateurs, tout en soutenant une production agricole nationale durable et respectueuse des exigences sanitaires.

Un flux annuel d'apport en cadmium dans les sols agricoles par les matières fertilisantes n'excédant pas $2 \text{ g Cd ha}^{-1}\text{an}^{-1}$, quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole, est le niveau limite recommandé par l'Anses à la suite de ses travaux publiés en 2019. Il permettrait de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et, par conséquent, de diminuer l'exposition alimentaire associée.

Afin de respecter ce flux, l'Anses (2019) recommande :

- une concentration en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source ;
- de tendre vers une concentration égale ou inférieure à 1 mg Cd kg^{-1} de matière sèche (MS) dans les fertilisants d'origine organique.

Au regard du niveau de préoccupation sanitaire pour la population générale française associé au cadmium, l'Anses recommande d'appliquer le plus tôt possible ces valeurs limites en cadmium pour les matières fertilisantes épandues sur les sols agricoles.

Pour atteindre ces valeurs limites, des changements de pratiques sont indispensables d'où l'importance d'identifier à la fois les éventuels verrous (organisationnels, techniques, économiques...) et aussi les leviers mobilisables pour :

- les engrais minéraux phosphatés ;
- les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture ;
- les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR).

Il est important de rappeler que les engrais minéraux phosphatés (la roche broyée étant considérée comme un produit naturel) et les MAFOR sont autorisés en agriculture biologique (AB) : celle-ci est donc potentiellement tout aussi impactée que l'agriculture conventionnelle par la présence de cadmium.

Pour les engrais minéraux phosphatés, plusieurs voies de mise sur le marché peuvent actuellement être empruntées par les fabricants en France. La conformité au règlement (UE) 2019/1009¹³² n'est pas obligatoire et la mise sur le marché d'un produit en conformité avec le droit national ou les règles générales de libre circulation du traité sur le fonctionnement de l'UE reste possible : dans ce cas, en France, une limite en cadmium de $90 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ s'applique, dans l'attente d'un nouveau décret encadrant l'innocuité et l'efficacité des MFSC en France. Pour qu'un produit obtienne le marquage CE, la limite de $60 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ figurant dans le règlement (UE) 2019/1009 s'applique. Aucune base de données officielles sur la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France n'a été identifiée. Il est nécessaire d'abaisser la limite réglementaire en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, de telle sorte qu'elle soit inférieure ou égale à $20 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ et de façon à ne pas excéder un flux annuel d'apport en cadmium dans les sols agricoles

¹³² Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE

de 2 g Cd ha⁻¹an⁻¹ (Anses 2019). Cela est d'intérêt quelle que soit la voie de mise sur le marché et quel que soit le type d'agriculture (conventionnel ou bénéficiant du label AB). Selon les simulations réalisées par Sterckeman et al. (2018a & b) et Carne et al. (2021), maintenir un niveau de concentration en-dessous de ces valeurs permettrait une diminution perceptible de l'accumulation du cadmium dans les sols au cours du temps, et serait indispensable pour abaisser la proportion de la population surexposée au cadmium par la voie alimentaire (Anses, 2019a).

Deux voies de réduction de la concentration en cadmium ont été identifiées : d'une part, le recours à des sources d'approvisionnement en roches phosphatées ou produits dérivés présentant de moindres concentrations en cadmium, et d'autre part, la mise en œuvre de procédés de décadmiation lors de la fabrication des engrais minéraux phosphatés permettant une réduction du cadmium à la source (avant sa dispersion dans l'environnement).

Une évolution vers des approvisionnements en roche / engrais minéraux phosphatés à faible concentration en cadmium pourrait contribuer au respect d'une valeur limite abaissée en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés commercialisés en France. L'ampleur et la nature des substitutions que cela impliquerait (produits, fournisseurs, pays d'origine) ainsi que les conditions associées sont difficiles à estimer puisqu'il n'existe pas aujourd'hui de système d'acquisition systématique et de partage de ces données par les différents acteurs.

Les procédés de décadmiation apparaissent faisables, avec des techniques existantes, et à un coût raisonnable puisque leur mise en œuvre engendrerait des surcoûts agricoles limités (Sterckeman et al. 2018). En regard, il est plus globalement rappelé que le coût de l'inaction, pour partie estimé en France par une évaluation économique du fardeau de l'ostéoporose attribuable au cadmium, à l'horizon 2040, pourrait aller jusqu'à 2,6 milliards d'euros si l'exposition n'est pas réduite (en considérant la première année suivant la première fracture, chez les femmes de plus de 55 ans) (Ougier et al. 2021). La décadmiation contribuerait à réduire ce fardeau à un coût maîtrisé.

Une analyse du marché permettrait d'identifier les différentes sources d'approvisionnement envisageables et les possibilités de recours à la décadmiation selon les fournisseurs / fabricants, ainsi que les implications techniques, socio-économiques et géopolitiques associées.

Pour les amendements, engrais organiques / organo-minéraux et supports de culture, ainsi que les MAFOR, dans un contexte actuel de diminution des apports en phosphore d'origine minérale et de progression des usages d'intrants organiques, la contribution relative des matières organiques aux apports de phosphore aux sols agricoles français a eu tendance à augmenter ces dernières années. Pour ces intrants, est rappelée la précédente recommandation de l'Anses, celle de tendre vers une concentration en cadmium égale ou inférieure à 1 mg.kg⁻¹ MS dans les fertilisants d'origine organique, afin de ne pas dépasser un flux annuel de 2 g Cd ha⁻¹ an⁻¹ pour l'ensemble des matières fertilisantes (Anses, 2019a ; 2021). Il est noté que cet objectif est indispensable à atteindre dans un contexte de politiques publiques encourageant l'utilisation des MAFOR comme étant issues de ressources renouvelables dans une logique d'économie circulaire. A cet égard, l'absence de réglementation du cadmium dans les effluents d'élevage est identifiée comme une lacune. Il conviendrait notamment de mener une réflexion sur les modalités d'analyse possibles des effluents d'élevage à l'échelle des exploitations pour contribuer au respect des flux maximaux d'éléments traces métalliques (ETM) dans les sols. Par ailleurs, l'applicabilité de techniques de remédiation des ETM dans les eaux usées pourrait être plus précisément explorée.

9.2.2 Action à court-terme : promouvoir une évolution des pratiques agricoles

En complément de la réduction des apports de cadmium en agissant sur les matières fertilisantes, il serait nécessaire d'agir sur les pratiques de production agricole, en particulier pour les denrées contribuant le plus à l'exposition au cadmium de la population générale. En effet, parmi ces aliments figurent des denrées agricoles essentiellement ou en partie produites et consommées en France. Les experts ont établi plusieurs constats et formulé des recommandations à cet égard.

D'une part, les experts soulignent que l'exploitation agricole n'est pas soumise à une analyse de sols : certaines informations sur la qualité du sol ne sont donc pas nécessairement connues par les agriculteurs (fonds géochimique naturel ou pollutions anciennes). De plus, le respect de concentrations maximales en cadmium dans le sol n'est exigé que pour l'épandage des boues de STEP, digestats de méthanisation et cendres. En ce sens, les experts recommandent d'étendre l'exigence de caractérisation de la concentration en cadmium dans les parcelles agricoles et de respect de concentrations maximales, à déterminer dans le cadre de futurs travaux, avant l'épandage de toutes matières fertilisantes.

D'autre part, des travaux indiquent la nécessité d'un flux annuel d'apport en cadmium n'excédant pas $2 \text{ g Cd ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ quelles que soient la nature et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole, afin de maîtriser la contamination des sols, des productions agricoles, et l'exposition alimentaire associée (Anses, 2018c ; 2021). Par conséquent, les experts recommandent de fixer un flux d'apport de cadmium de $2 \text{ g Cd} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ comme limite à ne pas dépasser.

Pour appuyer la mise en œuvre de ces recommandations, plusieurs moyens sont identifiés :

- Promouvoir, de manière plus systématique qu'actuellement, des pratiques de fertilisation au plus près des besoins au regard de la problématique du cadmium, notamment par des taux d'application et des choix de fertilisant tenant compte des concentrations en cadmium mesurées dans les parcelles concernées, au moyen d'outils adaptés. La mise en œuvre d'une agriculture de précision (par exemple : épandage à taux variable en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques) permettrait ainsi de limiter la contamination des sols. Cela permettrait par ailleurs de réduire la dépendance aux engrais minéraux phosphatés, une ressource non-renouvelable, tout en préservant la fertilité acquise du sol (Demay et al. 2022).
- Promouvoir des pratiques permettant de remobiliser le phosphore du sol, stocké sous des formes chimiques peu disponibles pour les cultures, constitue une voie complémentaire visant à limiter l'usage d'engrais minéraux phosphatés. Des pratiques agro-environnementales sont développées à cet effet (co-cultures, cultures intermédiaires, inoculation de micro-organismes solubilisant le phosphore inorganique). En ce sens, limiter les pertes en phosphore résultant de l'infiltration ou du ruissellement de l'eau peut induire une diminution des besoins en fertilisants. Par exemple, l'incorporation de résidus de culture dans les sols ou la mise en place de couverts végétaux sont cités comme des choix techniques possibles (Centre d'études et de prospective, 2016).
- Concernant la culture des aliments contributeurs majoritaires, céréales et pommes de terre, le recours à des variétés moins accumulatrices de cadmium, ou plus performantes pour mobiliser le phosphore des sols, peut être envisagé. Les nombreuses variétés existantes aujourd'hui sont le résultat de processus de sélection basés sur des critères très divers (précocité, usage culinaire, couleur, fermeté...), mais

sans rapport avec le potentiel des plantes à accumuler ou non le cadmium et/ou à mobiliser le phosphore.

- Enfin, la révision de l'étiquetage des matières fertilisantes, en mentionnant leur teneur en cadmium, représente un levier d'action possible. Il serait donc pertinent que les modalités d'étiquetage des matières fertilisantes soient réglementées de telle sorte que les utilisateurs puissent facilement identifier les produits à plus faible concentration en cadmium. L'étiquetage devrait également inclure des préconisations d'usage d'un engrais permettant aux utilisateurs de respecter le flux maximal de cadmium dans les sols agricoles, en tenant compte des apports de cadmium par d'autres intrants, et en attirant l'attention sur les risques de dépassement.

Les experts soulignent plusieurs points de vigilance :

- Certains engrais minéraux phosphatés et MAFOR étant utilisés à la fois en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique, il est nécessaire de mener une action globale sur l'évolution des pratiques agricoles et l'amélioration de la qualité des matières fertilisantes.
- Des pratiques immobilisant les polluants à court terme (par exemple : chaulage, apport de matières organiques, etc.) existent. Les experts rappellent qu'elles ne constituent pas une solution durable et pérenne, et ne peuvent se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles.
- Les recherches sont actives pour mettre à disposition des exploitants des variétés moins accumulatrices en cadmium, surtout pour les céréales ; elles méritent d'être soutenues. Toutefois, le recours à ces variants constitue une solution complémentaire moins protectrice que celle visant une limitation des intrants cadmiés en agriculture.

Pour favoriser l'évolution des pratiques, les experts recommandent que de telles évolutions soient accompagnées par des mesures de formation / information / accompagnement des agriculteurs et acteurs du conseil agricole sur la problématique du cadmium, en fonction des besoins. Cela devrait inclure une présentation des aides publiques existantes permettant de faciliter l'évolution des pratiques, notamment pour le développement d'une agriculture durable.

Ces différents enjeux s'inscrivent plus largement dans les évolutions attendues de la profession en matière de gestion de la santé des sols, comme en atteste la proposition de nouvelle Directive européenne sur la surveillance des sols et la résilience des sols¹³³, qui prévoit en ce sens des modalités de formation et de conseil à l'attention de la profession agricole.

9.2.3 Action à moyen-terme : réduire la contamination en cadmium des aliments

Considérant :

- les résultats d'analyse de cadmium dans 27 391 échantillons de diverses denrées alimentaires, obtenus entre 2010 et 2019, recensées dans le rapport de la plateforme de surveillance de la chaîne alimentaire (SCA) (Plateforme SCA, 2023), et leur

¹³³ Directive du parlement européen et du conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 29 septembre 2025. Le Parlement européen devrait procéder à son vote final dans les semaines à venir. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils>

comparaison avec les teneurs maximales réglementaires selon le règlement (UE) 2023/915¹³⁴ qui montre que peu de dépassement ont été observés ;

- les résultats de la présente expertise et de l'EAT3 soulignant des niveaux d'exposition actuels rien que par la voie alimentaire dépassant la dose journalière tolérable et la valeur toxicologique de référence interne, et identifiant des aliments contributeurs majeurs liés aux pommes de terre, produits céréaliers (céréales infantiles, pain et panification sèche raffinés, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés, pâtes, riz et blé raffinés), ainsi que des légumes ;

la réduction de l'exposition par la voie alimentaire, en agissant sur le niveau de contamination des aliments contributeurs, est un levier majeur. Le niveau d'ambition de cette option d'action, visant à réduire la contamination en cadmium des aliments, dépend de la diminution des apports en cadmium dans les sols par les intrants agricoles.

Cependant, il est constaté que les teneurs maximales (TM) réglementaires actuelles fixées pour le cadmium dans les denrées alimentaires (règlement (UE) 2023/915) ne sont pas suffisamment protectrices pour la santé du consommateur, puisque même lorsqu'elles sont respectées, une proportion de la population française présente une exposition dépassant la valeur toxicologique de référence.

Il est recommandé de réviser à la baisse les teneurs maximales en cadmium dans les aliments fortement contributeurs, de façon que leurs contributions conjointes à l'exposition n'entraînent pas un dépassement de la valeur toxicologique de référence.

9.2.4 Action continue : améliorer le contrôle et la surveillance tout au long de la chaîne de production des denrées alimentaires, depuis les intrants agricoles jusqu'aux aliments

Le contrôle et la surveillance du cadmium doivent être assurés tout au long des chaînes de production, depuis les sources de contamination en amont, notamment l'usage d'engrais minéraux phosphatés et de fertilisants d'origine organique, jusqu'à la denrée telle que consommée. Elles doivent être en cohérence avec les recommandations d'actions prises antérieurement, portant notamment sur une réduction des apports en cadmium par les matières fertilisantes et l'évolution des pratiques agricoles, ainsi qu'une révision à la baisse des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires.

D'une part, concernant les denrées alimentaires, il est rappelé que la stratégie nationale de surveillance du cadmium (et des autres ETM) repose sur le règlement (UE) 2022/932¹³⁵, complété par une analyse de risque nationale et locale. La répartition des analyses entre les différentes catégories d'aliments dans les plans de contrôle repose principalement sur la production nationale et la répartition de la population. Bien que le ciblage repose aussi sur une analyse de risque, la répartition des prélèvements ne reflète pas toujours la contribution réelle des aliments à l'exposition au cadmium, cette répartition étant conditionnée par les exigences européennes. Il est donc recommandé de renforcer la surveillance sanitaire du cadmium en ciblant les aliments les plus contributeurs à l'exposition, et en tenant compte des sources

¹³⁴ Règlement (UE) 2023/915 de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires

¹³⁵ Règlement d'exécution (UE) 2022/932 de la commission du 9 juin 2022 relatif aux modalités uniformes de réalisation des contrôles officiels en ce qui concerne les contaminants dans les denrées alimentaires, au contenu spécifique supplémentaire des plans de contrôle nationaux pluriannuels et aux modalités spécifiques supplémentaires applicables à leur élaboration

diffuses de cadmium, en particulier l'usage d'engrais minéraux phosphatés, de fertilisants organiques (composts, fumiers) et de boues de station d'épuration.

D'autre part, des plans de surveillance et de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) conduits en France par la DGCCRF¹³⁶ ces dernières années indiquent qu'une part non-négligeable des MFSC présente des non-conformités, y compris en matière de composition et d'innocuité des produits. L'information spécifique au cadmium n'a pas été identifiée. Par ailleurs, aucune base officielle de données représentatives sur les concentrations en cadmium dans les matières fertilisantes en France n'a été identifiée (engrais minéraux phosphatés, engrais organiques, organo-minéraux et supports de culture). L'existence d'une compilation centralisée des données agrégées sur le cadmium, issues des plans d'épandage de MAFOR à l'échelle nationale n'a pas non plus été identifiée. Il semble donc utile qu'une réflexion soit engagée afin que ce type de données soient collectées et disponibles, et de pouvoir suivre l'évolution des concentrations en cadmium dans les MFSC utilisées en France.

Au regard de ces recommandations, il est aussi nécessaire d'entreprendre une réflexion sur l'articulation des plans de contrôle des intrants et pratiques agricoles avec les plans ciblant les denrées alimentaires.

Enfin, les experts soulignent l'importance de la prise en considération des ETM, dont le cadmium, dans l'établissement prochain des critères relatifs à la qualité et à la résilience des sols à l'échelle européenne, prévus dans le cadre de proposition de Directive européenne sur le sujet¹³⁷.

9.2.5 Action continue : réduire l'exposition liée au tabagisme

La cinquième cible vise la réduction de l'exposition au cadmium par la voie tabagique. D'une part, la nocivité du tabac n'étant plus à démontrer, il convient d'inscrire la prévention de l'exposition au cadmium par la voie tabagique dans la poursuite et le renforcement de la lutte contre le tabagisme actif et passif. Ce levier constitue une action prioritaire de santé publique pour réduire l'exposition au cadmium et, plus largement, pour lutter contre les méfaits du tabac. Pour cela, il convient de dissuader les individus de fumer et/ou de les inciter à réduire et arrêter leur consommation dès que possible, ainsi que de réduire l'exposition à la fumée de tabac (tabagisme passif).

D'autre part, l'opportunité d'instaurer une teneur réglementaire en cadmium dans le tabac ou un niveau d'émission maximal pourrait être étudiée. Toutefois, cette question n'a pas été approfondie dans le cadre de la présente expertise, compte tenu des enjeux techniques, financiers, juridiques et politiques associés à la réglementation de la composition des produits du tabac. Quelle que soit l'issue d'une telle analyse, une vigilance est nécessaire pour prévenir tout usage marketing qui viserait à présenter un tabac contenant moins de cadmium comme « moins dangereux ».

Ainsi, la lutte anti-tabac et contre le tabagisme passif demeure le levier central de prévention de l'exposition au cadmium par cette voie.

¹³⁶ <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/les-fertilisants-et-supports-de-culture-un-secteur-sous>

¹³⁷ Directive du parlement européen et du conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 29 septembre 2025. Le Parlement européen devrait procéder à son vote final dans les semaines à venir. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2025/09/29/council-adopts-new-rules-for-healthier-and-more-resilient-european-soils>

9.3 Perspectives de recherche

La présente expertise a permis d'identifier plusieurs incertitudes d'ordre méthodologique, liées à un manque ou à une limite dans les connaissances disponibles, recensées dans le chapitre 8 du rapport, participant pour certaines à des perspectives de recherche. L'impact de ces incertitudes tend à sous-estimer les imprégnations prédites, dont les résultats corroborent le problème de santé publique lié au cadmium et soutiennent les recommandations d'options d'action prioritaires pour réduire l'imprégnation humaine. Plusieurs perspectives de recherche nécessitent d'être approfondies tant sur le plan de la préoccupation sanitaire et méthodologique que du pilotage des leviers.

Recommandations de recherche sur le plan de la préoccupation sanitaire

En matière d'évolution des pratiques agricoles et de sélection variétale d'espèces végétales moins accumulatrices de cadmium, le développement de variétés absorbant peu le cadmium et/ou performantes dans l'acquisition du phosphore est à explorer.

En matière de réduction des teneurs maximales en cadmium dans les aliments, il est recommandé d'engager une réflexion sur le développement d'une méthodologie spécifique. Cette méthodologie viserait à fixer une teneur maximale tenant compte de la contribution de l'aliment au régime alimentaire. Elle devrait également tenir compte de l'ensemble des autres sources d'exposition au cadmium. Le modèle méthodologique d'agrégation des sources et voies d'exposition, ainsi que de prédiction de la cadmiurie, mis en œuvre dans cette expertise, constitue à ce titre un support essentiel pour ce développement.

En matière de biosurveillance, la poursuite de la réalisation d'études régulières de biosurveillance pour suivre les niveaux d'imprégnation de la population française est encouragée, ainsi que l'évaluation de l'impact des mesures de gestion mises en place pour réduire l'imprégnation. De plus, cette expertise soulève le besoin de mesures d'imprégnation par le cadmium chez les enfants français âgés de moins de 6 ans. L'acquisition de ces données permettrait d'améliorer la compréhension des déterminants de l'exposition dès le plus jeune âge.

En matière de prévention secondaire et prise en charge des individus, il est souligné que les valeurs repères biologiques par classe d'âge ne peuvent pas être utilisées pour interpréter un dosage de cadmiurie à l'échelle individuelle, pour piloter le dépistage ou le suivi médical, pour lequel une approche spécifique doit être mise en œuvre.

Recommandations de recherche sur le plan de la préoccupation méthodologique

Cette expertise a identifié le besoin d'acquisition de données pour optimiser les résultats d'agrégation des sources et voies d'exposition, notamment en matière d'exposition au cadmium par l'inhalation de particules très fines dans l'air, par l'ingestion de poussières d'origine diverse (transports, industries, etc.), par la consommation de tous les produits de la mer, par les produits de consommation (jouets, tatouage, etc.), par les matériaux au contact des denrées alimentaires, par les produits de vapotage, ou encore par le tabagisme passif et ultra passif.

Le modèle toxicocinétique PBK utilisé dans cette expertise tient compte de l'exposition avant la naissance, en considérant les données de concentrations du cadmium dans le sang de cordon ombilical. Néanmoins, un modèle cinétique du cadmium *in utero* mériterait d'être développé afin d'affiner l'estimation de cette exposition prénatale.

Les résultats de l'expertise démontrent l'apport de la modélisation PBK en matière d'évolution de l'imprégnation en cadmium au cours de la vie, et de caractérisation du risque. Le modèle

pourra être utilisé pour définir des modalités de gestion du risque non plus globalement à l'échelle des populations « enfants » et « adultes » (comme c'est le cas dans les modèles classiques), mais spécifiquement par classes d'âges. En outre, des travaux pourraient être menés pour approfondir l'exploitation de ce type de modèle dans un but de prévention de situations à risque, et pour d'autres substances bioaccumulables.

Par ailleurs, il serait nécessaire d'estimer le fardeau sanitaire du cadmium tenant compte de toutes les voies d'exposition afin d'évaluer les conséquences de l'exposition au cadmium sur la santé de la population. Une telle estimation, assortie d'une analyse socio-économique intégrant les maladies et facteurs de risque associés, permettrait de définir et de comparer des interventions visant à améliorer la santé et à réduire les inégalités liées à cette exposition.

Enfin, dans la population générale, il serait nécessaire de mieux connaître son exposition professionnelle de manière à l'agréger aux autres sources et voies d'exposition. Le travail en cours dans le projet P6.2.1b « Aggregate exposure » du programme européen PARC sera utile dans cet objectif.

Recommandations de recherche concernant le pilotage de leviers d'action

Bien qu'initialement poursuivi comme objectif, les simulations de pilotage de leviers en matière d'impact sur les principales sources contributrices à l'imprégnation humaine n'ont pas pu être menées dans les délais impartis. Cependant, celles-ci seraient pertinentes afin d'affiner les recommandations des leviers d'actions ciblés, et le cas échéant réviser les limites en cadmium à la source en appui à la gestion. Les modèles méthodologiques existant dorénavant, la mise en œuvre de telles simulations amènerait à explorer l'impact d'une action sur une source environnementale à l'imprégnation humaine, en reliant le modèle « source-to-dose » (de la source d'apport en cadmium dans le sol jusqu'à l'aliment tel que consommé) développé par l'Anses (2019) et par Carne et al. (2021) au modèle d'agrégation et de prédiction de la cadmiurie développé dans la présente expertise.

Enfin, l'étude de la source alimentaire pourrait être approfondie par un travail supplémentaire de décomposition plus fine des groupes de denrées en ingrédients, afin d'identifier les principaux ingrédients contributeurs à l'exposition au cadmium ainsi que des leviers d'action spécifiques aux filières concernées.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 14 novembre 2025

10 Bibliographie

10.1 Publications

- Abraham, Edward. 2020. « Cadmium in New Zealand agricultural soils ». *New Zealand Journal of Agricultural Research* 63 (2) : 202-19. <https://doi.org/10.1080/00288233.2018.1547320>.
- ADEME. 2007. Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine. Rapport final, 329 p.
- ADEME. 2018. « Matières fertilisantes organiques : gestion et épandage. Guide des bonnes pratiques. » <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/1505-matieres-fertilisantes-organiques-gestion-et-epandage-9791029709845.html>.
- ADEME. 2025. « ADEME - Rencontres Nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués ». 2025. <https://rencontres-recherche-ssp.ademe.fr/>.
- Affum AO, Osae SD, Nyarko BJB, Afful S, Fianko JR, Akiti TT, Adomako D, Acquaaah SO, Dorleku M, Antoh E, Barnes F, Affum EA, 2015. Total coliforms, arsenic and cadmium exposure through drinking water in the Western Region of Ghana: application of multivariate statistical technique to groundwater quality. *Environ. Monit. Assess* 187.
- Afssa. 2007. « Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à la pertinence d'établir une teneur maximale en cadmium pour les gastéropodes, les échinodermes et les tuniciers et à l'évaluation des risques sanitaires liés à des teneurs élevées en cadmium dans les bulots et les pétoncles ». Afssa. <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2007sa0098.pdf>.
- Agrete. 2024. « Graph'Agri 2024. Agriculture - Forêt - Pêche | Alimentation - Industries agroalimentaires | Environnement - Territoire ». Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt. Consulté le 29 juillet 2025. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2024Integral/detail/>.
- Airton C. Martinsa. 2020. Blood cadmium levels and sources of exposure in an adult urban population in southern Brazil. *Environmental Research* 187-109618
- Ali, Nasir, Fazal Hadi, et Muhammad Ali. 2019. « Growth stage and molybdenum treatment affect cadmium accumulation, antioxidant defence and chlorophyll contents in Cannabis sativa plant ». *Chemosphere* 236 (décembre) : 124360. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124360>.
- Andersen, Mikael Skou. 2022. « Fertilizer tax in Sweden ». Institute for European Environmental Policy. https://ieep.eu/wp-content/uploads/2022/12/SE-Fertilizer-tax-final_REV.pdf.
- Anetor, G.O., N.L. Nwobi, G.O. Igharo, O.O. Sonuga, et J.I. Anetor. 2022. « Environmental Pollutants and Oxidative Stress in Terrestrial and Aquatic Organisms: Examination of the Total Picture and Implications for Human Health ». *Frontiers in Physiology* 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.931386>.
- Anses. 2011a. Avis de l'Anses et rapport d'expertise relatifs à l'Étude de l'alimentation française 2 (EAT2) – Tome 1 : contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER2006sa0361Ra1.pdf>

- Anses. 2011b. Avis de l'Anses relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme (saisine n° 2011-SA-0194). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2011sa0194.pdf>
- Anses. 2012. Avis de l'Anses et rapport d'expertise collective : Valeur toxicologique de référence pour le cadmium et ses composés. Saisine n°2009-SA-0344. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort, 100 p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/CHIM2009sa0344Ra.pdf>.
- Anses. 2016. Avis de l'Anses du 16 septembre 2016 et rapports d'expertise relatifs à l'Etude de l'Alimentation Totale Infantile (EATi). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/fr/content/etude-de-l%E2%80%99alimentation-totale-infantile>
- Anses. 2017. « Rapport d'expertise collective. Exposition au cadmium. Propositions de valeurs toxicologiques de référence par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urines, ...). » Saisine « 2015-SA-0140 ». Anses. Consulté le 3 avril 2025. <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2015SA0140Ra-1.pdf>.
- Anses. 2018a. « Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif au « risque sanitaire lié à la consommation de gibier au regard des contaminants chimiques environnementaux (dioxines, polychlorobiphényles (PCB), cadmium et plomb) ». Anses. <https://www.anses.fr/en/system/files/ERCA2015SA0109.pdf>.
- Anses. 2018b. « Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif « au risque sanitaire lié à la mise sur le marché et à la consommation de productions végétales produites sur un site pollué en plomb et cadmium par l'ancienne fonderie Métaleurop. » Saisine n° 2017-SA-0036. Anses. Consulté le 11 février 2025. <https://www.anses.fr/fr/content/extrait-davis-de-lanses-relatif-au-risque-sanitaire-lie-la-mise-sur-le-marche-et-la>.
- Anses. 2018c. « Exposition au cadmium. Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales. Question n°3. » Saisine « 2015-SA-0140 ». Maisons-Alfort. Consulté le 11 février 2025. <https://www.anses.fr/en/system/files/VSR2015SA0140Ra-3.pdf>.
- Anses. 2018d. « Rapport d'expertise collective. Fabrication et utilisation des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) : Evaluation des expositions au cadmium en milieu professionnel. » Saisine « 2015-SA-0140 ». Maisons-Alfort. Consulté le 11 février 2025. <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2015SA0140Ra-2.pdf>.
- Anses. 2019. Avis de l'Anses et rapports d'expertise relatifs à l'exposition au cadmium – révision de valeur toxicologique de référence par ingestion et de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques et proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions végétales et l'exposition alimentaire. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/system/files/VSR2015SA0140.pdf>
- Anses. 2019b. « Les études de l'Alimentation Totale (EAT) ». Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. 19 février 2019. <https://www.anses.fr/fr/content/les-etudes-de-lalimentation-totale-eat>.

- Anses. 2019c. « Optimisation de la surveillance de la contamination chimique des aliments. Avis révisé de l'Anses. Rapport d'expertise collective. » Saisine n° 2015-SA-0187. Consulté le 28 mars 2025. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2015SA0187Ra.pdf>.
- Anses. 2020a. Avis du 21 juillet 2020 de l'Anses relatif à la teneur maximale en cadmium pour les algues destinées à l'alimentation humaine. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2017SA0070.pdf>
- Anses. 2020b. Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'analyse des données de contamination en cadmium des bulots issues d'un plan de surveillance exploratoire réalisé en 2017-2018
- Anses. 2020c. « RAPPORT de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la déclaration des produits du tabac et des produits connexes en France - Produits du vapotage - Bilan 2016-2020 ». Anses. <https://www.anses.fr/fr/system/files?file=CONSO2018SA0189Ra-2.pdf>.
- Anses. 2020d. « Guide relatif à l'évaluation des dossiers de demandes d'autorisation de mise sur le marché et de permis des matières fertilisantes et des supports de culture ». Consulté le 11 février 2025. https://www.anses.fr/fr/system/files/Guide-evaluation-MFSC_2020-07.pdf.
- Anses. 2021. Appui scientifique et technique du 02 novembre 2021 relatif à la recommandation de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la contamination en cadmium des sols et des productions agricoles et l'exposition de la population humaine - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort <https://www.anses.fr/fr/content/note-ast-de-lanses-relative-%C3%A0-la-recommandation-de-niveaux-en-cadmium-dans-les-mati%C3%A8res>
- Anses. 2022. « Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux « critères, échantillonnage et méthodes analytiques pour la surveillance et le contrôle de la conformité réglementaire des produits du tabac et produits du vapotage sur le marché français » ». <https://www.anses.fr/system/files/TABAC2020SA0015Ra.pdf>
- Anses. 2023. Avis du 02 mars 2023 relatif au rapport « Intégration de l'exposome dans les activités de l'Anses ». Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2022METH0197Ra.pdf>
- Anses. (2026). Avis relatif aux résultats de l'Étude de l'alimentation totale française 3 (EAT3) - Acrylamide, aluminium, argent, cadmium, mercure et plomb. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
- Arrouays, D., Jolivet, C., Boulonne, L., Bodineau, G., Saby, N., Grolleau, E. 2002. A new initiative in France: a multi-institutional soil quality monitoring network. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 88 (2002), 93–105.
- Arrouays, D., Richer-de-Forges, A.-C., Héliès, F., Mulder, V.L., Saby, N., Chen, S., Martin, M., Dobarco, M.R., Follain, S., Jolivet, C., Laroche, B., Loiseau, T., Cousin, I., Lacoste, M., Ranjard, L., Toutain, B., Le Bas, C., Eglin, T., Bardy, M., Antoni, V., Meersmans, J., Ratié, C., Bispo, A. 2020. Impacts of national scale digital soil mapping programs in France. Geoderma Regional 23 (2020), e00337 ISSN 2352-0094. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00337>

- ARS Ile de France. 2022. « Guide "Aménager un jardin collectif" ». <https://www.iledefrance.ars.sante.fr/guide-amenager-un-jardin-collectif>.
- ATSDR. 2012 - Toxicological profile for cadmium. U.S. Department of health and human Services, Public Health Service. 487 pp.
- Australian Department of Health and Aged Care. *Australia New Zealand Food Standards Code – Schedule 19 – Maximum levels of contaminants and natural toxicants*.
- Axe, P., L. Sonesten, E. Skarbövik, U. Pirntke, R. Berbee, et A.M. Christensen. 2022. « Inputs of Mercury, Cadmium and Lead via Water and Air to the OSPAR Maritime Area. In: OSPAR, 2023: The 2023 Quality Status Report for the North-East Atlantic ». London : OSPAR Commission. Consulté le 11 février 2025. <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/indicator-assessments/inputs-heavy-metals/>.
- Ayangbenro, A.S., et O.O. Babalola. 2017. « A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (1). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
- Baddredine, Rabia, Camille Dumat, Philippe Branchu, et Ronald Charvet. 2019. « Méthodologie d'évaluation des risques sanitaires pour les jardins urbains. » Consulté le 29 juillet 2025. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/construire-et-concevoir-la-ville-durable-42676210/methodologie-d-evaluation-des-risques-sanitaires-pour-les-jardins-urbains-ge1017/conclusions-ge1017niv10004.html>.
- Bair, E.C. 2022. « A Narrative Review of Toxic Heavy Metal Content of Infant and Toddler Foods and Evaluation of United States Policy ». *Frontiers in Nutrition* 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.919913>.
- Balicco, Alexis, Amivi Oleko, Emmanuelle Szego, Laura Boschat, Valérie Deschamps, Abdessattar Saoudi, Abdelkrim Zeghnoun, et Clémence Filloi. 2017. « Protocole Esteban : une Étude transversale de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (2014–2016) ». *Toxicologie Analytique et Clinique, Surveillance biologique des expositions*, 29 (4) : 517-37. <https://doi.org/10.1016/j.toxac.2017.06.003>.
- Ballabio et al. 2024. Cadmium in topsoils of the European Union – An analysis based on LUCAS topsoil database. *Science of the Total Environment* 912 (2024) 168710
- Baloch S, Kazi TG, Baig JA, Afridi HI, Arain MB. 2020. Occupational exposure of lead and cadmium on adolescent and adult workers of battery recycling and welding workshops: Adverse impact on health. *Sci Total Environ*. 2020 Jun 10;720:137549.
- Barbillon, Anne, Christine Aubry, et Nastaran Manouchehri. 2019. « Guide REFUGE : Caractérisation de la contamination des sols urbains destinés à la culture maraîchère et évaluation des risques sanitaires ». <https://agroparistech.hal.science/hal-02869953v1/file/guiderefuge%20vf%20juin%202020.pdf>.
- Barré, Tangui, Emmanuel Lahaie, Vincent Di Beo, Patrizia Carrieri, Raphaël Andler, Viêt Nguyen-Thanh, et François Beck. 2024. « Cannabidiol use in France in 2022: Results from a nationwide representative sample of adults ». *Drug and Alcohol Review* 43 (5) : 1294-1304. <https://doi.org/10.1111/dar.13842>.
- basel.int. 2025. « Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal ». 2025. <https://www.basel.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesSignatories/tabid/4499/Default.aspx>.

- Batista, Diane Rezende, Liana Sousa Coelho, Suzana Erico Tanni, et Irma De Godoy. 2024. « Metal in biological samples from electronic cigarette users and those exposed to their second-hand aerosol: a narrative review ». *Frontiers in Medicine* 11 (mai) : 1349475. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1349475>.
- Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris, 410 p.
- Baize D. 2009. Éléments traces dans les sols. Fonds géochimiques naturels et tenAdvances in Agronomy, Volume 166eurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n° 57, juillet 2009, pp. 63-72.
- Baize D., Deslais W., Gaiffe M. 1999. Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 2, pp. 85-104.
- Barbier, O., Jacquillet, G., Tauc, M., Cougnon, M., Poujeol, P. 2005. Effect of heavy metals on, and handling by the kidney. *Nephron Physiol* 99, p105–p110. <https://doi.org/10.1159/000083981>.
- Beaudouin Rémy, Micallef Sandrine, Brochot Céline. 2010. A stochastic whole-body physiologically based pharmacokinetic model to assess the impact of inter-individual variability on tissue dosimetry over the human lifespan, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Volume 57, Issue 1, 2010, Pages 103-116, ISSN 0273-2300, <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2010.01.005>.
- Béchaux C, Bodin L, Cléménçon S, Crépet A. 2014. PBPK and population modelling to interpret urine cadmium concentrations of the French population. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2014 Sep 15;279(3):364-372. doi: 10.1016/j.taap.2014.06.026. Epub 2014 Jul 3. PMID: 24998972.
- Bekö G, Weschler CJ, Langer S, Callesen M, Toftum J, et al. 2013. Children's Phthalate Intakes and Resultant Cumulative Exposures Estimated from Urine Compared with Estimates from Dust Ingestion, Inhalation and Dermal Absorption in Their Homes and Daycare Centers. *PLOS ONE* 8(4): e62442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062442>
- Bel, François, Gérard Drouet d'Aubigny, Anne Lacroix, et Amédée Mollard. 2004. « Efficacité et limites d'une taxe sur les engrais azotés : éléments d'analyse à partir de seize pays européens ». *Économie & prévision* 166 (5) : 99-113. <https://doi.org/10.3406/ecop.2004.7384>.
- Belon, E., M. Boisson, I. Z. Deportes, T. K. Eglin, I. Feix, A. O. Bispo, L. Galsomies, S. Leblond, et C. R. Guellier. 2012. « An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils ». *Science of The Total Environment* 439 (novembre) : 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.011>.
- Benson, Nsikak U., Winifred U. Anake, Adebayo E. Adedapo, Omowunmi H. Fred-Ahmadu, et Olusegun O. Ayejuyo. 2017. « Toxic metals in cigarettes and human health risk assessment associated with inhalation exposure ». *Environmental Monitoring and Assessment* 189 (12) : 619. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6348-x>.
- Bertrand, J., E. Julio, J. Cotucheau, F. Dorlhac de Borne, et P. Berthomieu. 2017. « Identification of genetic determinants controlling cadmium accumulation in tobacco ». *Santa Cruz do Sul*. <https://www.coresta.org/abstracts/identification-genetic-determinants-controlling-cadmium-accumulation-tobacco-30823.html>.

- Besaratinia, Ahmad. 2025. « Electronic Cigarette-Derived Metals: Exposure and Health Risks in Vapers. » *Chemical research in toxicology* 38 (4) : 542-56. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.4c00520>.
- Bhattacharyya, M. H. 2009. Cadmium Osteotoxicity in Experimental Animals: Mechanisms and Relationship to Human Exposures. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 258–265. <http://doi.org/10.1016/j.taap.2009.05.015>
- Bidar Géraldine, Aurélie Pelfrène, Christophe Schwartz, Christophe Waterlot, Karin Sahmer, Franck Marot, et Francis Douay. 2020. « Urban kitchen gardens: Effect of the soil contamination and parameters on the trace element accumulation in vegetables – A review ». *Science of The Total Environment* 738 (octobre) : 139569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139569>.
- Bindschedler, S., Cailleau, G., Verrecchia, E. 2016. Role of Fungi in the biomineralization of calcite. *Minerals* 6, 41. <https://doi.org/10.3390/min6020041>.
- Birke M., Reimann C., Rauch U., Ladenberger A., Demetriades A., Jähne-klingberg F., Oorts K., Gosar M., Dinelli E., Halamic J. 2017. GEMAS: Cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe — Original data versus cl-transformed data *Journal of Geochemical Exploration* 173, 13–30.
- Blanc, Gérard, Jörg Schäfer, Alexandra Coynel, Cécile Bossy, et Lionnel Dutruch. 2015. « Quelles sont les sources assurant la pérennité de la pollution en cadmium depuis plus de trente ans? Quelles solutions pour y remédier ? » Laboratoire EPOC UMR CNRS 5805, OASU, Université de Bordeaux. Consulté le 2 avril 2025. https://www.epoc.u-bordeaux.fr/pages_equipes/images/tgm_cahier1.pdf.
- Bluesign. 2023. « Bluesign® Restricted Substances List (RSL) Consumer Safety Limits. Version 14.0. » https://www.bluesign.com/wp-content/uploads/2023/10/bluesign-rsl_v14.0_compressed.pdf.
- Bottin, Anne, Irénée Joassard, et Valéry Morard. 2014. « L'environnement en France ». Service de l'observation et des statistiques, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Consulté le 11 février 2025. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/references-ree-2014.pdf>.
- Bravin, Matthieu. 2024. « Pollution des sols agricoles, quel est l'état des connaissances ? / Afis Science - Association française pour l'information scientifique ». Afis Science - Association française pour l'information scientifique. 2024. <https://www.afis.org/Pollution-des-sols-agricoles-quel-est-l-etat-des-connaissances>.
- Brengi, Sary H., Abdel-Ghany M. El-Gindy, Islam El-Sharkawy, et Ibrahim A. Abouelsaad. 2021. « Variation in Cadmium Accumulation among Potato Cultivars Grown on Different Agricultural Sites: A Potential Tool for Reducing Cadmium in Tubers ». *Horticulturae* 7 (10) : 377. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100377>.
- BRGM. 2019. « Fiche de criticité du cadmium ». <https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/fiche-de-criticite-du-cadmium-est-disponible-sur-mineralinfo>.
- Brignon, J.M., L. Malherbe, et C. Canturias-Villesuzanne. 2017. « Cadmium et ses principaux composés ». Ineris. Consulté le 11 février 2025. <https://substances.ineris.fr/sites/default/files/archives/7440-43-9%20--%20Cadmium%20--%20FTE.pdf>.

- Bundesinstitut Für Risikobewertung (BfR). 2020. « Ceramic Crockery: BfR Recommends Lower Release of Lead and Cadmium: BfR Opinion No 043/2020 of 21 September 2020 ». BfR-Stellungnahmen 2020 (21 septembre 2020): no 043. <https://doi.org/10.17590/20201214-110843>.
- Bundesinstitut für Risikobewertung. 2025. Metal kitchen utensils: Do substances transfer into food?: BfR opinion nr. 038/2025 from 22 September 2025, BfR-Stellungnahmen. Bundesinst. für Risikobewertung. <https://doi.org/10.17590/20251015-095945-0>
- Carne G, Leconte S., Sirot V., Breysse N., Badot P-M., Bispo A., Deportes I. Z., Dumat C., Rivière G., Crépet A. 2021. Mass balance approach to assess the impact of cadmium decrease in mineral phosphate fertilizers on health risk: The case-study of French agricultural soils. *Science of The Total Environment*, Volume 760, 2021, 143374, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143374>
- Carolin, C.F., P.S. Kumar, A. Saravanan, G.J. Joshiba, et M. Naushad. 2017. « Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review ». *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5 (3): 2782-99. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>.
- Caruso, Rosalie V., Richard J. O'Connor, W. Edryd Stephens, K. Michael Cummings, et Geoffrey T. Fong. 2013. « Toxic metal concentrations in cigarettes obtained from U.S. smokers in 2009: results from the International Tobacco Control (ITC) United States survey cohort ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11 (1) : 202-17. <https://doi.org/10.3390/ijerph110100202>.
- Caudeville, Julien. 2011. « Développement d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques : construction d'indicateurs spatialisés en vu d'identifier les inégalités environnementales à l'échelle régionale ». These de doctorat, Compiègne. <https://theses.fr/2011COMP1960>.
- Celia Sabando-Fraile et al. 2024. Applying circular economy principles and life cycle assessment: A novel approach using vine shoots waste for cadmium removal from water. *Science of the Total Environment* 926 (2024) 171947.
- Centre d'études et de prospective. 2016. « Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l'agriculture ». Analyse 93. Consulté le 27 août 2025. <https://agriculture.gouv.fr/vers-une-gestion-durable-du-phosphore-ressource-critique-pour-lagriculture-analyse-ndeg-93>.
- Centre d'études et de prospective. 2022. « Prospective des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) à l'horizon 2035 ». Analyse 176. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, Service de la statistique et de la prospective. Consulté le 29 juillet 2025. <https://agriculture.gouv.fr/prospective-des-matieres-fertilisantes-dorigine-residuaire-mafor-lhorizon-2035-analyse-ndeg-176>.
- Centre d'études et de prospective. 2023. « Estimation des besoins actuels et futurs de l'agriculture biologique en fertilisants organiques ». Analyse 195. Ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la souveraineté alimentaire. Consulté le 12 novembre 2025. <https://agriculture.gouv.fr/estimation-des-besoins-actuels-et-futurs-de-lagriculture-biologique-en-fertilisants-organiques>.
- CERPHOS, Mustapha Ghayor, et Mohamed Smani. 1993. Procédé de fabrication d'acide phosphorique marchand à très basse teneur en cadmium. FR2687657A1, filed 3 février 1993, et issued 27 août 1993. <https://patents.google.com/patent/FR2687657A1/fr>.

- Changhe Wei et al. 2022. Method on site-specific source apportionment of domestic soil pollution across China through public data mining: A case study on cadmium from non-ferrous industries. *Environmental Pollution* 295 (2022) 118605.
- Cheng, Cheng, Hui Han, Yaping Wang, Linyan He, et Xiafang Sheng. 2020. « Metal-immobilizing and urease-producing bacteria increase the biomass and reduce metal accumulation in potato tubers under field conditions ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 203 (octobre) : 111017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111017>.
- Ciesielski T, Weuve J, Bellinger DC, Schwartz, Lanphear J B, Wright R O. 2012. Cadmium exposure and neurodevelopmental outcomes in U.S. children. *Environ Health Perspect* 120:758–763. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104152>
- CIRC (IARC), International Agency for Research on Cancer. 2012. Cadmium. Vol 100C. 121-145.
- CIRC (IARC), International Agency for Research on Cancer. 1993. Cadmium and cadmium compounds. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 58: 119–237.
- CITEPA. 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023.
- Codex Alimentarius for International Standards. 2022. « Code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des fèves de caco par le cadmium (CXC 81-2022) ». Consulté le 11 février 2025. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXC%2B81-2022%252FCXC_081f.pdf.
- Codex Alimentarius for International Standards. 2023. « General Standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995) - adopted in 1995, amended in (...) 2023. » https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/fr/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf.
- COMIFER. 2019. « La fertilisation P K Mg - Phosphore, Potassium & Magnésium. Les bases du raisonnement. » Consulté le 29 juillet 2025. https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2015/03/COMIFER_RAPPORT_fertilisation_15102019.pdf.
- Commissariat général au développement durable. 2019. « Métaux lourds : cadmium, mercure et plomb ». 2019. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/sante/les-produits-chimiques-ressources/article/metaux-lourds-cadmium-mercure-et-plomb>.
- Commission Européenne. 2016. « Limits for cadmium in phosphate fertilisers. Accompanying the document. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 ». European Commission. Consulté le 13 octobre 2025. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5aa49d31-ec29-11e5-8a81-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_4&format=PDF.
- Conseil de l'Europe. 2020. « Résolution CM/Res(2020)9 sur l'innocuité et la qualité des matériaux et objets pour contact alimentaire ». <https://rm.coe.int/09000016809fe04a>.
- Conseil de l'Union Européenne. 2024. « Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Orientation générale. » <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11299-2024-INIT/fr/pdf>.

- Conseil de l'Union Européenne. 2025. *Position du Conseil en première lecture en vue de l'adoption d'une DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) - Adoptée par le Conseil le 29 septembre 2025.*
- Cordell, Dana, Jan-Olof Drangert, et Stuart White. 2009. « The story of phosphorus: Global food security and food for thought ». *Global Environmental Change* 19 (2) : 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>.
- Cupit, M., O. Larsson, C. de Meeûs, G. H. Eduljee, et M. Hutton. 2002. « Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilisers — II ». *Science of The Total Environment* 291 (1) : 189-206. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01099-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01099-3).
- Das, Surajit, Hirak R. Dash, et Jaya Chakraborty. 2016. « Genetic basis and importance of metal resistant genes in bacteria for bioremediation of contaminated environments with toxic metal pollutants. » *Applied microbiology and biotechnology* 100 (7) : 2967-84. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7364-4>.
- Dassonville C. et al. 2019. Qualité de l'air intérieur et contamination des poussières déposées au sol dans les écoles en France. Rapport référencé CSTB-OQAI/2018-125, Décembre 2019, 178 pages.
- Davister A. 1994. « Studies and research on processes for the elimination of cadmium from phosphoric acid ». présenté à International Fertilizer Industry Association (IFA) technical Conference, Amman. <https://www.fertilizer.org/resource/studies-and-research-on-processes-for-the-elimination-of-cadmium-from-phosphoric-acid/>.
- Deepika D., Sharma R.P., Schuhmacher M., Kumar V., 2021. Risk assessment of perfluorooctane sulfonate (PFOS) using dynamic age dependent physiologically based pharmacokinetic model (PBPK) across human lifetime. *Environ. Res.*, 199 (2021), Article 111287
- Degola, Francesca, Laura Fattorini, Elisa Bona, Christian Triscari Sprimuto, Emanuele Argese, Graziella Berta, et Luigi Sanità di Toppi. 2015. « The symbiosis between *Nicotiana tabacum* and the endomycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* increases the plant glutathione level and decreases leaf cadmium and root arsenic contents ». *Plant Physiology and Biochemistry* 92 (juillet) : 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.04.001>.
- Delmaar, C.J.E., Schreurs, R., Bakker, M.I. et al. 2023. PACEMweb: a tool for aggregate consumer exposure assessment. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 33, 971–979 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41370-022-00509-7>
- Demay, Joséphine, Bruno Ringeval, Sylvain Pellerin, et Thomas Nesme. 2023. « Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources ». *Nature Geoscience* 16 (1) : 69-74. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01092-0>.
- DGCCRF. 2016a. Fiche MCDA n°2 (V01 – 01/05/2016) Aptitude au contact alimentaire des matériaux inorganiques (hors métaux et alliages) destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/securite/produits_alimentaires/materiaux_contact/doc_pdf/inorganiques-fiche-verre-cristal-ceramique-vitroceramique-objets-emaille.pdf
- DGCCRF. 2016b. « Résultat du plan de contrôle des matières fertilisantes et supports de culture ». 2016. <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/resultat-du-plan-de-contrôle-des-matières-fertilisantes-et>.

- DGCCRF. 2017. Fiche MCDA n°1 (V02 – 01/04/2017) Aptitude au contact alimentaire des métaux et alliages destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/securite/produits_alimentaires/materiaux_contact/fiches-metaux-alliages-v2.pdf?v=1516960501
- DGCCRF. 2021. Fiche MCDA n°3 (V03-09/09/2021) Aptitude au contact alimentaire des matériaux organiques à base de matière synthétique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/securite/produits_alimentaires/materiaux_contact/doc_pdf/fiches-materiaux-organiques-matieres-synthetiques.pdf?v=1651150177
- DGCCRF. 2021b. « Fertilisants : enquête en terreau connu ». 2021. <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/fertilisants-enquete-en-terreau-connu>.
- DGCCRF. 2025a. « Les fertilisants et supports de culture : un secteur sous surveillance ». Ministère de l'Économie des Finances et de la Souveraineté industrielle et énergétique. 2025. <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/laction-de-la-dgccrf/les-enquetes/les-fertilisants-et-supports-de-culture-un-secteur-sous>.
- DGCCRF. 2025b. « Matériaux au contact des denrées alimentaires ». 2025. <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Materiaux-au-contact-des-denrees-alimentaires>.
- DGCCRF. 2025c. « Prenez garde aux matériaux mis au contact des aliments ». 2025. <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/les-fiches-pratiques/prenez-garde-aux-materiaux-mis-au-contact-des-aliments>.
- Dhami, N.K., Quirin, M.E.C., Mukherjee, A., 2017. Carbonate biomineralization and heavy metal remediation by calcifying fungi isolated from karstic caves. *Ecol Eng* 103, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.007>.
- Direction de l'information légale et administrative. 2025. « Taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) ». 2025. <https://entreprendre.service-public.fr/vosdroits/F23497>.
- Direction générale de la prévention des risques (DGPR). 2011. « Guide de mise en oeuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués ». Ministère de l'écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- Direction générale de la prévention des risques (DGPR). 2017. « Guide méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués ». Ministère en charge de l'Environnement. https://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/documents/2022-02/methodo_ssp_2017.pdf.
- Direction générale de la prévention des risques (DGPR). 2024. « Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement ». Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. https://tex-infoterre.brgm.fr/sites/websites/tex-infoterre.brgm.fr/files/documents/2024-09/2024%2009%20Guide%20Valorisation%20TEX_SSP_v2bis_0.pdf.
- Dong, Z.Y., Huang, W.H., Xing, D.F., Zhang, H.F. 2013. Remediation of soil cocontaminated with petroleum and heavy metals by the integration of electrokinetics and biostimulation. *J Hazard Mater* 260, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.003>.
- Douay, F., H. Roussel, C. Pruvot, A. Loriette, et H. Fourier. 2008. « Assessment of a remediation technique using the replacement of contaminated soils in kitchen gardens nearby a former lead smelter in Northern France ». *Science of The Total Environment*

- 401 (1-3) : 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.025>.
- Douay, Francis, Aurélie Pelfrène, Julie Planque, Hervé Fourrier, Antoine Richard, Hélène Roussel, et Bertrand Girondelot. 2013. « Assessment of potential health risk for inhabitants living near a former lead smelter. Part 1: metal concentrations in soils, agricultural crops, and homegrown vegetables ». *Environmental Monitoring and Assessment* 185 (5) : 3665-80. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2818-3>.
- Drake, Lars, et Stefan Hellstrand. 1998. « The Economics of the Swedish Policy to Reduce Cadmium in Fertilisers ». Kemikalieinspektionen. Consulté le 11 février 2025. <https://www.kemi.se/en/publications/pms/1998/pm-2-98-the-economics-of-the-swedish-policy-to-reduce-cadmium-in-fertilisers>.
- Durand, Cécile, Nicolas Sauthier, et Valérie Schwoebel. 2015. « Assessment of exposure to soils contaminated with lead, cadmium, and arsenic near a zinc smelter, Cassiopée Study, France, 2008 ». *Environmental Monitoring and Assessment* 187 (6) : 352. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4587-2>.
- Duval, Mathilde, Anne GrouhelPellouin, et Sylvain Vandoolaeghe. 2024. « Contamination métallique dans l'estuaire de la Gironde. Une synthèse des connaissances depuis 1979 ». Ifremer. Consulté le 11 février 2025. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00881/99276/109226.pdf>.
- EDQM-Conseil de l'Europe. 2024. « Métaux et alliages constitutifs des matériaux et objets pour contact alimentaire. Deuxième édition du guide technique à l'intention des fabricants et des autorités réglementaires. » Direction européenne de la qualité du médicament & soins de santé (EDQM). Consulté le 28 mars 2025. <https://www.edqm.eu/fr/metals-and-alloys-used-in-food-contact-materials-and-articles>.
- Eissa F, Elhawat N, Alshaal T. 2023. Comparative study between the top six heavy metals involved in the EU RASFF notifications over the last 23 years. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2023 Oct 15;265:115489. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115489. Epub 2023 Sep 20. PMID: 37738770.
- Engström A, Michaëlsson K, Suwazono Y, Wolk A, Vahter M, Åkesson A. 2011. Long-term cadmium exposure and the association with bone mineral density and fractures in a population-based study among women. *J Bone Miner Res*. 2011 Mar; 26(3):486-95. <https://doi.org/10.1002/jbmr.224>
- Engström A., Michaëlsson K., Vahter M., Julin B., Wolk A., Åkesson A. 2012. Associations between dietary cadmium exposure and bone mineral density and risk of osteoporosis and fractures among women, *Bones* 50 (2012) 1372-1378. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2012.03.018>
- European Commission. 2011. « Information note. Consumption of brown crab meat. Ares (2011) 176550 ». https://food.ec.europa.eu/system/files/2019-03/cs_contaminants_catalogue_cadmium_brown-crab-meat-consumption.pdf.
- European Commission. 2019. « Cadmium in chocolate ». https://food.ec.europa.eu/system/files/2019-03/cs_contaminants_catalogue_cadmium_chocolate_en.pdf.
- European Commission. 2025. « Third River Basin Management Plans. Second Flood Hazard and Risk Maps and Second Flood Risk Management Plans. Member state: France ». Consulté le 11 février 2025. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_25_342.

- European Food Safety Authority, EFSA. 2009. Cadmium in food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. The EFSA Journal 980, 1-139. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.980>
- European Food Safety Authority, EFSA. 2012. Cadmium dietary exposure in the European population. EFSA Journal 2012;10(1):2551. [37 pp.] <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2551>
- Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. The Exposure Factors Handbook provides information on various physiological and behavioral factors commonly used in assessing exposure to environmental chemicals.
- Exposure Factors Handbook: 2017 Edition. The Exposure Factors Handbook provides information on various physiological and behavioral factors commonly used in assessing exposure to environmental chemicals.
- Fantino, M., and E. Gourmet. 2008. "Apports nutritionnels en France en 2005 chez les enfants non allaités âgés de moins de 36 mois." Archives de Pédiatrie 15 (4):446-455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2008.03.002>.
- FAO. 2004. *Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable*. Bulletin FAO : engrais et nutrition végétale 13. Rome : FAO.
- FAO-WHO. 2021. « Evaluation of certain food additives and contaminants: ninety-first report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives ». 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054585>.
- FAO/WHO, 2022. Code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des fèves de cacao par le cadmium. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXC%2B81-2022%252FCXC_081f.pdf
- FAO-WHO. 2024. « Document de discussion sur l'élaboration d'un code d'usages pour la prévention et la réduction de la contamination des aliments par le cadmium ». https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-17%252FWorking%2Bdocuments%252Fcf17_16f.pdf.
- Ficheux, A.-S., Roudot, A.-C. 2016. Evaluation probabiliste de l'exposition de la population française aux produits cosmétiques. Laboratoire d'Evaluation du Risque chimique pour le Consommateur. Rapport final (AAP 2012).
- Figuerola B., Eugenio. 2008. « Are more restrictive food cadmium standards justifiable health safety measures or opportunistic barriers to trade? An answer from economics and public health ». *Science of The Total Environment* 389 (1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.015>.
- Food and Drug Administration (U.S. FDA). 2012. « Harmful and Potentially Harmful Constituents in Tobacco Products and Tobacco Smoke: Established List ». avril 2012. <https://www.fda.gov/tobacco-products/rules-regulations-and-guidance-related-tobacco-products/harmful-and-potentially-harmful-constituents-tobacco-products-and-tobacco-smoke-established-list>.
- Food and Drug Administration (U.S. FDA). 2023. « Help Protect Children from Environmental Contaminants: Healthy Food Choices for Your Baby Aged 6-12 Months ». 2023.

- <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/help-protect-children-environmental-contaminants-healthy-food-choices-your-baby-aged-6-12-months>.
- Food and Drug Administration (U.S. FDA). 2024. « Cadmium in Food and Foodwares ». FDA. FDA. 3 mai 2024. <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/cadmium-food-and-foodwares>.
- Food and Drug Administration (U.S. FDA). 2025. « Closer to Zero: Reducing Childhood Exposure to Contaminants from Foods ». 2025. <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/closer-zero-reducing-childhood-exposure-contaminants-foods>.
- Food Safety and Standards Authority of India (FSSAI). *Food Safety and Standards (contaminants, toxins and residues) Regulations, 2011*.
- FranceAgriMer. 2023. « Souveraineté alimentaire : un éclairage par les indicateurs de bilan ». Consulté le 29 juillet 2025. <https://www.franceagrimer.fr/chiffre-et-analyses-economiques/souverainete-alimentaire-un-eclairage-par-les-indicateurs-de-bilan>.
- FranceAgriMer. 2024. « Fiche filière - Céréales ». <https://www.franceagrimer.fr/chiffre-et-analyses-economiques/fiche-filiere-cereales>.
- FranceAgriMer, AND International, et CERES PRESS. 2024. « Fonctionnement général du marché des engrais minéraux dans la situation spécifique des filières grandes cultures ». FranceAgriMer. Consulté le 29 juillet 2025. <https://www.franceagrimer.fr/chiffre-et-analyses-economiques/fonctionnement-general-du-marche-des-engrais-mineraux-dans-la>.
- FranceAgriMer. 2025a. « Fiche filière - Pomme de terre ». <https://www.franceagrimer.fr/node/3656>.
- FranceAgriMer. 2025b. « Fiche filière - Tabac ». https://www.franceagrimer.fr/content/download/76405/document/20250103_FICHE%20FILIERE%20TABAC%202025.pdf.
- Frazzoli C, Ruggieri F, Battistini B, Orisakwe OE, Igbo JK, Bocca B. E-WASTE threatens health: The scientific solution adopts the one health strategy. *Environ Res*. 2022 Sep;212(Pt A):113227.
- Fresquez, Mark R., R. Steven Pappas, et Clifford H. Watson. 2013. « Establishment of Toxic Metal Reference Range in Tobacco from US Cigarettes ». *Journal of Analytical Toxicology* 37 (5) : 298-304. <https://doi.org/10.1093/jat/bkt021>.
- Fréry, N., Saoudi, A., Garnier, R., Zeghnoun, A., Falq, G., & Guldner, L. 2011. 'Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement' (p. 151) Institut de veille sanitaire: Saint-Maurice (Fra). www.invs.sante.fr
- Gallagher CM, Meliker JR. 2010. Blood and urine cadmium, blood pressure, and hypertension: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect*. 2010 Dec;118(12):1676-84. doi: 10.1289/ehp.1002077. Epub 2010 Aug 17. PMID: 20716508; PMCID: PMC3002186.
- Ganguly, Koustav, Bettina Levänen, Lena Palmberg, Agneta Åkesson, et Anders Lindén. 2018. « Cadmium in tobacco smokers: a neglected link to lung disease? » *European Respiratory Review* 27 (147) : 170122. <https://doi.org/10.1183/16000617.0122-2017>.

- Gardner RM, Kippler M, Tofail F, Bottai M, Hamadani J, Grandér M, Nermell B, Palm B, Rasmussen KM, Vahter M. 2013. Environmental exposure to metals and children's growth to age 5 years: a prospective cohort study. *Am J Epidemiol.* 2013 Jun 15; 177(12):1356-67.
- Gastellu Thomas, Le Bizec Bruno, Rivière Gilles. 2025. Integrating the lifelong exposure dimension of a chemical mixture into the risk assessment process. Application to trace elements, *Food and Chemical Toxicology*, Volume 195, 2025, 115111, ISSN 0278-6915, <https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.115111>.
- Gaur, Sumit, et Rupali Agnihotri. 2019. « Health Effects of Trace Metals in Electronic Cigarette Aerosols-a Systematic Review ». *Biological Trace Element Research* 188 (2) : 295-315. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1423-x>.
- Genchi, G., M.S. Sinicropi, G. Lauria, A. Carocci, et A. Catalano. 2020. « The effects of cadmium toxicity ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (11). <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>.
- Gomez, Conchita. 2022. « Fumée de tabac et impacts du Cadmium et du monoxyde de carbone sur le développement foeto-placentaire ». Theses, Université de Limoges. <https://theses.hal.science/tel-03879705>.
- Gong, Jia-You, Manosij Ghosh, et Peter Hm. Hoet. 2023. « Association between metal exposure from e-cigarette components and toxicity endpoints: A literature review ». *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 144 (octobre) : 105488. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105488>.
- Granata, Silvia, Fabio Vivarelli, Camilla Morosini, Donatella Canistro, Moreno Paolini, et Lucy C. Fairclough. 2024. « Toxicological Aspects Associated with Consumption from Electronic Nicotine Delivery System (ENDS): Focus on Heavy Metals Exposure and Cancer Risk ». *International Journal of Molecular Sciences* 25 (5) : 2737. <https://doi.org/10.3390/ijms25052737>.
- Gravel S, Roberge B, Calosso M, Gagné S, Lavoie J, Labrèche F. 2023. Occupational health and safety, metal exposures and multi-exposures health risk in Canadian electronic waste recycling facilities. *Waste Manag.* 2023 Jun 15;165:140-149
- Gray, Colin W., Zicheng Yi, Niklas J. Lehto, Brett H. Robinson, Kiran Munir, et Jo-Anne E. Cavanagh. 2019. « Effect of cultivar type and soil properties on cadmium concentrations in potatoes ». *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 47 (3) : 182-97. <https://doi.org/10.1080/01140671.2019.1599028>.
- Gray, C.W., et J.-A.E. Cavanagh. 2022. « The state of knowledge of cadmium in New Zealand agricultural systems: 2021 ». *New Zealand Journal of Agricultural Research.* <https://doi.org/10.1080/00288233.2022.2069130>.
- Guejjoud, H., F. Curie, et C. Grosbois. 2024. « Analyzing a century of agricultural phosphorus surplus and its long-term key drivers in France ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 129 (3) : 317-35. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10300-1>.
- Gustin K., Tofail F., Vahter M., Kippler M. 2018. Cadmium exposure and cognitive abilities and behavior at 10 years of age: A prospective cohort study, *Environment International*, Volume 113, 2018, Pages 259-268, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.020>.

- Gyamfi O., Aboko J., Ankapong E., Marfo J.T., Awuah-Boateng N.Y., Sarpong K., Dartey E. 2024. A systematic review of heavy metals contamination in cosmetics. *Cutan Ocul Toxicol.* 2024 Mar;43(1):5-12. doi: 10.1080/15569527.2023.2268197. Epub 2023 Nov 2. PMID: 37916307.
- Hanser O., Melczer M., Martin Remy A., Ndaw S. 2022. Occupational exposure to metals among battery recyclers in France: Biomonitoring and external dose measurements. *Waste Management*. Volume 150, 2022, Pages 122-130, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.044>.
- Hague Centre for Strategic Studies (HCSS). 2012. « Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market. Robust Strategies in Times of Uncertainty ». 17. Consulté le 29 juillet 2025. <https://hcss.nl/report/risks-and-opportunities-in-the-global-phosphate-rock-market-robust-strategies-in-times-of-uncertainty/>.
- Haider, F.U., C. Liqun, J.A. Coulter, S.A. Cheema, J. Wu, R. Zhang, M. Wenjun, et M. Farooq. 2021. « Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.
- Halpern, Charlotte, Pierre Lascombes, et Patrick Le Galès. 2014. *L'instrumentation de l'action publique: Controverses, résistance, effets*. Presses de Sciences Po. <https://doi.org/10.3917/scpo.halpe.2014.01>.
- Hamid, Y., L. Tang, B. Hussain, M. Usman, Q. Lin, M.S. Rashid, Z. He, et X. Yang. 2020. « Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: A review ». *Science of the Total Environment* 707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136121>.
- Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP). 2022. « Rapport relatif à la définition de valeurs repères pour des contaminants des sols pollués : le cadmium ». *Rapport de l'HCSP*. Paris : Haut Conseil de la Santé Publique. Consulté le 11 février 2025. <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1292>.
- Haute Autorité de Santé (HAS). 2020. « Sols pollués par l'arsenic : information à destination des habitants ». https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2020-07/fiche_usager_arsenic_v5-150720.pdf.
- Haute Autorité de Santé (HAS). 2024. « Dépistage, prise en charge et suivi des personnes potentiellement surexposées au cadmium du fait de leur lieu de résidence ». Consulté le 11 février 2025. https://www.has-sante.fr/jcms/p_3367010/fr/depistage-prise-en-charge-et-suivi-des-personnes-potentiellement-surexposees-au-cadmium-du-fait-de-leur-lieu-de-residence.
- He, Yi, Klaus von Lampe, Laura Wood, et Marin Kurti. 2015. « Investigation of lead and cadmium in counterfeit cigarettes seized in the United States ». *Food and Chemical Toxicology* 81 (juillet) : 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.04.006>.
- Health Canada. 2025. « List of Contaminants and Other Adulterating Substances in Foods ». Notices;list of regulations. 19 février 2025. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/food-safety/chemical-contaminants/contaminants-adulterating-substances-foods.html>.
- Hejna, M., E. Onelli, A. Moscatelli, M. Bellotto, C. Cristiani, N. Stroppa, et L. Rossi. 2021. « Heavy-metal phytoremediation from livestock wastewater and exploitation of exhausted biomass ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (5) : 1-16. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052239>.

- Hermant Marie, Blanchard Olivier, Perouel Guillaume, Boulanger Guillaume, Merlo Mathilde, Desvignes Virginie. 2017. Environmental Exposure of the Adult French Population to Permethrin. Risk analysis, Volume38, Issue4, April 2018, Pages 853-865, <https://doi.org/10.1111/risa.12866>
- Hongwei Yang. 2025. An intelligent approach: Integrating ChatGPT for experiment planning in biochar immobilization of soil Cd. Separation and Purification Technology 352 – 128170
- Houot, Sabine, Marie-Noelle Pons, Marilys Pradel, Marc Antoine Caillaud, Isabelle Savini, et Anaïs Tibi. 2014. « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier ». Report. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). Consulté le 11 février 2025. <https://doi.org/10.15454/1hmm-we49>.
- Hudcová A., Vymazal J., Rozkošný M. 2019. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. Soil and Water Research, 14 :104-120.
- Imseng M., Wiggengerhauser M, Müller M., Keller A., Frossard E., Wilcke W., Bigalke M. 2018. The Fate of Zn in Agricultural Soils: A Stable Isotope Approach to Anthropogenic Impact, Soil Formation, and Soil-Plant Cycling. Environ. Sci. Technol., 53, 4140–4149.
- INERIS. 2016. Les substances dangereuses pour le milieu aquatique dans les rejets industriels (RSDE) Rapport INERIS-DRC-16-149870-01979B, Verneuil-en-Halatte
- INRA. 2004. Etude de l'alimentation totale française (EAT1). <https://www.anses.fr/fr/system/files/RapportEAT1.pdf>
- Irfan, Muhammad, Xianhua Liu, Khalid Hussain, Suraya Mushtaq, Jonnathan Cabrera, et Pingping Zhang. 2021. « The global research trend on cadmium in freshwater: a bibliometric review. » *Environmental science and pollution research international*, avril. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13894-7>.
- Intercéréales. 2024. « Des chiffres et des céréales. L'essentiel de la filière – édition 2024 ». Consulté le 29 juillet 2025. <https://publications.intercereales.com/produit/des-chiffres-et-des-cereales-edition-2024/>.
- IPCS.,2010. Characterization and Application of Physiologically Based Pharmacokinetic Model in Risk Assessment, 2010, p24.
- JECFA. 2023. « Safety evaluation of certain contaminants in food. Prepared by the ninety-first meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) - WHO additives series 82. Cadmium ».
- Jeong KS, Park H, Ha E, Hong Y-C, Ha M, Park H, Kim BN, Lee BE, Lee SJ, Lee KY, Kim JH, Kim Y. 2015. Performance IQ in children is associated with blood cadmium concentration in early pregnancy. J Trace Elem Med Biol., 30 (2015), 107-11. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.11.007>.
- Karpf R. et Kreuz S. 2017. Emissions by the operation of metal shredders – Is it possible to reduce it? 4th International VDI Conference 2017; Energy and Materials from Waste; May 17-18, 2017 in Copenhagen, Denmark. https://www.ete-a.de/img/Vortraege/56_Emissions_by_the_operation_of_metal_shredders-Is_it_possible_to_reduce_it.pdf
- Ke Zhang et al. 2024. Evaluation of cadmium phytoextraction potential of peanut and the rhizospheric properties of specific cultivars Journal of Cleaner Production 452-142228

- Khalid, Sana, Muhammad Shahid, Nabeel Khan Niazi, Behzad Murtaza, Irshad Bibi, et Camille Dumat. 2017. « A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils ». *Journal of Geochemical Exploration* 182 (novembre) : 247-68. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>.
- Khan Muhammad Amjad, Khan Sardar, Khan Anwarzeb, Alam Mehboob. 2017. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the Total Environment* 601–602 (2017) 1591–1605 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>
- Khoshhali, Mehri; Davoodi, Soheila; Ebrahimpour, Karim; Shoshtari-Yeganeh, Bahareh,; Kelishadi, Roya. 2020. The association between maternal exposure to organophosphate pesticides and neonatal anthropometric measures: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Research in Medical Sciences* 25(1):p 79, | DOI: 10.4103/jrms.JRMS_919_19
- Kim, Joon, Hangyul Song, Junghoon Lee, Yoon Jung Kim, Hye Soo Chung, Jae Myung Yu, Gyuho Jang, et al. 2023. « Smoking and passive smoking increases mortality through mediation effect of cadmium exposure in the United States ». *Scientific Reports* 13 (1) : 3878. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30988-z>.
- Kippler M, Tofail F, Hamadani JD., Gardner R et al. 2012. Early-Life Cadmium Exposure and Child Development in 5-Year-Old Girls and Boys: A Cohort Study in Rural Bangladesh. *Environ Health Perspect* 120:1462–1468. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104431>
- Kjellström Tord, Nordberg Gunnar F. 1978. A kinetic model of cadmium metabolism in the human being, *Environmental Research*, Volume 16, Issues 1–3, 1978, Pages 248-269, ISSN 0013-9351, [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(78\)90160-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(78)90160-3).
- Kouzbour, Sanaa. 2022. « Hydrometallurgical processes applied to the demanganization of water and the decadmiation of industrial phosphoric acid ». https://theses.hal.science/tel-04529673/file/2022UCFAC120_KOUZBOUR.pdf.
- Kouzbour, Sanaa, Bouchaib Gourich, Fabrice Gros, Christophe Vial, Fouad Allam, et Youssef Stiriba. 2019. « Comparative analysis of industrial processes for cadmium removal from phosphoric acid: A review ». *Hydrometallurgy* 188 (septembre) : 222-47. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.06.014>.
- Kouzbour, Sanaa, Bouchaib Gourich, Fabrice Gros, Christophe Vial, et Youssef Stiriba. 2022. « A novel approach for removing cadmium from synthetic wet phosphoric acid using sulfide precipitation process operating in batch and continuous modes ». *Minerals Engineering* 187 (septembre) : 107809. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107809>.
- Kubier Andreas, Richard T. Wilkin, et Thomas Pichler. 2019. « Cadmium in soils and groundwater: A review ». *Applied Geochemistry* 108 (septembre) : 104388. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>.
- Kudithipudi, C., et J.W. Morris. 2020. « Reduction of cadmium in tobacco leaves ». Online. <https://www.coresta.org/abstracts/reduction-cadmium-tobacco-leaves-34102.html>.
- Lafon, Laurent, et Gisèle Jourda. 2020. « Politiques industrielles et minières des sols : assumer ses responsabilités, réparer les erreurs du passé et penser durablement l'avenir. Commission d'enquête sur la pollution des sols ». Rapport d'information n° 700 (2019-2020). Sénat. Consulté le 11 février 2025. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2019/r19-700-1-notice.html>.

- Lamon L., Paini A., Siccardi M., Doyle J., McNamara C., Galea K.S., Ghosh M., Louro H., Silva M.J., El Yamani N., Dusinska M., Moeller R., Duca R.C., Cubadda F., Viegas S., Martins C., Price P. 2025. Physiologically based toxicokinetic models in aggregate exposure: A review, *Toxicology Letters*, Volume 413, 2025, 111725, ISSN 0378-4274, <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2025.111725>.
- Lara-Torres Sara, Figueiredo Dany, Paz Soraya, Gutiérrez Angel J., Rubio Carmen, González-Weller Dailos, Revert Consuelo, Hardisson Arturo. 2021. Determination and risk assessment of toxic metals in lipsticks from Europe and China, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Volume 67, 2021, 126792, ISSN 0946-672X, <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126792>.
- Leclerc A., Laurent A. 2017. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in 2000-2014. *Science of the Total Environment*, 590-591, 452-460.
- Leconte S., Rousselle C., Bodin L., Clinard F., Carne G. 2021. Refinement of health-based guidance values for cadmium in the French population based on modelling. *Toxicology Letters*, Volume 340, 2021, pages 43-51, ISSN 0378-4274, <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.12.021>
- Lin J, Zhang F, Lei Y. 2016. Dietary intake and urinary level of cadmium and breast cancer risk: A meta-analysis. *Cancer Epidemiol.* 2016 Jun;42:101-7. doi: 10.1016/j.canep.2016.04.002. Epub 2016 Apr 14. PMID: 27085960.
- Liu Z. Cai L., Liu Y., Chen W., Wang Q. 2019. Association between prenatal cadmium exposure and cognitive development of offspring: A systematic review, *Environmental Pollution*, Volume 254, Part B, 2019, 113081, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113081>.
- Liu W.R., Zeng D., She L., Su W.X., HE D.C., Wu G.Y., Ma X.R., Jiang S., Jiang C.H., Ying G.G. 2020. Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China. *Science of the Total Environment*, 734, 139023.
- Liu, Haiwei, Haiyun Wang, Yan Zhang, Haohao Wang, Jiashuo Yang, Jikun Liu, et Yi Shi. 2019. « Comparison of heavy metal accumulation and cadmium phytoextraction rates among ten leading tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cultivars in China ». *International Journal of Phytoremediation* 21 (7) : 699-706. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1556589>.
- Lugon-Moulin, N, M Zhang, F Gadani, L Rossi, D Koller, M Krauss, et G.J Wagner. 2004. « Critical Review of the Science and Options for Reducing Cadmium in Tobacco (*Nicotiana Tabacum* L.) and Other Plants ». Dans *Advances in Agronomy.* , 83 : 111-80. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)83003-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)83003-7).
- Malarkodi M., Krishnasamy R., Kumaraperumal R., Chitdeshwari T. 2007. Characterization of heavy metal contaminated soils of Coimbatore district in Tamil Nadu. *Agronomy* 6, 147–151.
- Marcus, Vincent, et Olivier Simon. 2015. « Les pollutions par les engrais azotés et les produits phytosanitaires : coûts et solutions ». Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). Consulté le 2 juin 2025. <https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083486/22321.pdf>.

- Marini, Michele, Dario Caro, et Marianne Thomsen. 2020. « The new fertilizer regulation: A starting point for cadmium control in European arable soils? » *Science of The Total Environment* 745 (novembre) : 140876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140876>.
- McLaughlin, M. J., N. A. Maier, K. Freeman, K. G. Tiller, C. M. J. Williams, et M. K. Smart. 1995. « Effect of potassic and phosphatic fertilizer type, fertilizer Cd concentration and zinc rate on cadmium uptake by potatoes ». *Fertilizer research* 40 (1) : 63-70. <https://doi.org/10.1007/BF00749863>.
- McLaughlin, M, et D Miller. 2018. « Review of the New Zealand Cadmium Management Strategy, prepared for the Fertiliser Association of New Zealand and New Zealand Ministry for Primary Industries. »
- McLaughlin, M.J., E. Smolders, F.J. Zhao, C. Grant, et D. Montalvo. 2021. « Managing cadmium in agricultural systems ». Dans *Advances in Agronomy*. , 166 : 1-129. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.004>.
- Meng W., Wang Z., Hu B., Wang Z., Li H., Goodman R.C. 2016. Heavy metals soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China : a case study assessment. *Agricultural Waste Management*, 171: 153-161.
- Mie, A., H.R. Andersen, S. Gunnarsson, J. Kahl, E. Kesse-Guyot, E. Rembiałkowska, G. Quaglio, et P. Grandjean. 2017. « Human health implications of organic food and organic agriculture: A comprehensive review ». *Environmental Health: A Global Access Science Source* 16 (1). <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4>.
- Ministère de l'Environnement. 1978. Inventaire national de la qualité alimentaire. Direction de la prévention des pollutions, Ministère de l'Environnement.
- Ministère de la santé et de la prévention. 2023. « Petit guide de l'auto-consommation en toute sécurité. Jardinage, pêche, chasse et cueillette ». https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/2023_09_guidesanitaire_autoconsommation.pdf.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2019. « Le volet agricole de la Feuille de route nationale pour l'économie circulaire: place au bilan! » <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/95176>.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2023. « Consultation publique : projet de réglementation encadrant l'innocuité et l'efficacité des matières fertilisantes et des supports de culture [clôturée] ». 30 octobre 2023. <https://agriculture.gouv.fr/consultation-publique-projet-de-reglementation-encadrant-linnocuite-et-lefficacite-des-matieres>.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2024. « Plans de surveillance et de contrôle ». Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2024. <https://agriculture.gouv.fr/plans-de-surveillance-et-de-contrôle>.
- Ministères de l'Aménagement du Territoire et de la Transition écologique. 2025. « Sites et sols pollués | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique ». 2025. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/sites-sols-pollues>.
- Mission interministérielle de lutte contre les drogues et les conduites addictives (MILDECA). 2023. « Lancement du Programme national de lutte contre le tabac 2023-2027 (PNLT) ». 2023. <https://www.drogues.gouv.fr/lancement-du-programme-national-de-lutte-contre-le-tabac-2023-2027-pnlt>.
- Mombo, Stéphane, Yann Foucault, Frédéric Deola, Irène Gaillard, Sylvaine Goix, Muhammad Shahid, Eva Schreck, Antoine Pierart, et Camille Dumat. 2016. « Management of human health risk in the context of kitchen gardens polluted by lead and cadmium near

- a lead recycling company ». *Journal of Soils and Sediments* 16 (4) : 1214-24. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1069-7>.
- Mortvedt J.J. 1996. Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fertilizer Research* : 55-61.
- Navarro-Tapia, Elisabet, Mariona Serra-Delgado, Lucía Fernández-López, Montserrat Meseguer-Gilabert, María Falcón, Giorgia Sebastiani, Sebastian Sailer, Oscar Garcia-Algar, and Vicente Andreu-Fernández. 2021. "Toxic Elements in Traditional Kohl-Based Eye Cosmetics in Spanish and German Markets" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18, no. 11: 6109. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116109>
- Ngo DM, Hough RL, Le TT, Nyberg Y, Le BM, Nguyen CV, Nguyen MK, Oborn I. 2012. Assessing dietary exposure to cadmium in a metal recycling community in Vietnam: age and gender aspects. *Sci Total Environ.* 2012 Feb 1;416:164-71.
- Nguyen, Christophe, Agathe Roucou, Guénolé Grignon, Jean-Yves Cornu, et Benoît Méléard. 2021. « Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars ». *Journal of Hazardous Materials* 401 (janvier) : 123131. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123131>.
- Ni W, Huang Y, Wang X, Zhang J, Wu K. 2014. Associations of neonatal lead, cadmium, chromium and nickel co-exposure with DNA oxidative damage in an electronic waste recycling town. *Sci Total Environ.* 2014 Feb 15;472:354-62.
- Nicholson F.A., Smith S.R., Alloway B.J., Carlton-smith C., Chambers B.J. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci Total Environ*, 311:205–19.
- Niño-Savala, A.G., Z. Zhuang, X. Ma, A. Fangmeier, H. Li, A. Tang, et X. Liu. 2019. « Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: An overview ». *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 6 (4) : 419-30. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019273>.
- Noömi Lombaert et al. 2023. Cadmium Monitoring at the Workplace: Effectiveness of a Combination of Air and Biomonitoring. *Toxics* 2023, 11(4), 354; <https://doi.org/10.3390/toxics11040354>.
- Nordic Council of Ministers, Cadmium Review, January 2003 (https://cdn.who.int/media/docs/default-source/chemical-safety/cadmium/nmr-cadmium.pdf?sfvrsn=36032d8_2&download=true)
- Nunes, N., Ragonezi, C., Gouveia, C.S.S., Pinheiro de carvalho, M.Â.A. 2021. Review of Sewage Sludge as a Soil Amendment in Relation to Current International Guidelines: A Heavy Metal Perspective. *Sustainability* 2021, 13, 2317. <https://doi.org/10.3390/su13042317>
- Nziguheba, Generose, et Erik Smolders. 2008. « Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries ». *Science of The Total Environment* 390 (1) : 53-57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.031>.
- Oleko A, Fillol C, Saoudi A, Zeghnoun A, Bidondo ML, Gane J, Balicco A. 2021. *Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016*. Saint-Maurice : Santé publique France, 2021. 43 p. Disponible à partir de l'URL : <https://www.santepubliquefrance.fr>

- Ololade IA, Adewunmi A, Ologundudu A, Adeleye A. 2009. Effects of household wastes on surface and underground waters. *Int. J. Phys. Sci* 4, 22–29.
- ONISEP. 2025. « BP responsable d'entreprise agricole (REA) ». 2025. <https://www.onisep.fr/ressources/univers-formation/formations/lycees/bp-responsable-d-entreprise-agricole>.
- Oosterhuis, F.H., F.M. Brouwer, et H.J. Wijnants. 2000. *A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: economic and environmental implications*. IVM Report. Amsterdam : Institute for Environmental Studies. <https://research.vu.nl/en/publications/a-possible-eu-wide-charge-on-cadmium-in-phosphate-fertilisers-eco>.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2003. « Convention-cadre de l'OMS pour la lutte antitabac ». Consulté le 11 février 2025. <http://www.emro.who.int/fr/tobacco/fctc/convention-cadre-oms-lutte-antitabac.html>.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2010. « Projet de directives pour l'application des articles 9 et 10 de la CCLAT de l'OMS – Document d'information ». https://www3.paho.org/hq/dmdocuments/2010/Backgrounder%20Articles%209%2610_2010Sept%20FR.pdf.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). 2017a. *Directives sur la qualité de l'eau de boisson*. 4e éd., Intégrant le premier additif. Genève : Organisation mondiale de la Santé. <https://iris.who.int/handle/10665/258887>.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2017b. « Convention-cadre de l'OMS pour la lutte ant-tabac. Directives partielles pour l'application des articles 9 et 10 ». Consulté le 8 octobre 2025. <https://fctc.who.int/fr/convention/treaty-instruments/regulation-of-the-contents-of-tobacco-products-and-regulation-of-tobacco-product-disclosures>.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2019. « Exposure to cadmium: a major public health concern ». WHO/CED/PHE/EPE/19.4.3. Geneva. Consulté le 11 février 2025. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-EPE-19-4-3>.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2023. « Application des articles 9 et 10 de la Convention-cadre de l'OMS pour la lutte antitabac (réglementation de la composition des produits du tabac et réglementation des informations sur les produits du tabac à communiquer) : rapport du Groupe d'experts ». <https://iris.who.int/items/6faa2258-e7a6-413c-ae54-7249e2ad9828>.
- OSPAR Commission. 2023. « Chemicals for Priority Action ». OSPAR Commission. 2023. <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/priority-action>.
- Ougier, Eva, Karine Fiore, Christophe Rousselle, Ricardo Assunção, Carla Martins, et Jurgen Buekers. 2021. « Burden of osteoporosis and costs associated with human biomonitoring cadmium exposure in three European countries: France, Spain and Belgium ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 234 (mai) : 113747. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113747>.
- Ou Langbo, Wang Huanhuan, Chen Cen, Chen Long, Zhang Wei, Wang Xuejun. 2018. Physiologically based pharmacokinetic (PBPK) modeling of human lactational transfer of methylmercury in China, *Environment International*, Volume 115, 2018, Pages 180-187, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.018>
- Ougier E., Fiore K., Rousselle C., Assunção R., Martins C., Buekers J. 2021. Burden of osteoporosis and costs associated with human biomonitoring cadmium exposure in three European countries: France, Spain and Belgium. *Int J Hyg Environ Health*. 2021

- May;234:113747. doi: 10.1016/j.ijheh.2021.113747. Epub 2021 Apr 13. PMID: 33862487
- Pappas, R. S., G. M. Polzin, C. H. Watson, et D. L. Ashley. 2007. « Cadmium, lead, and thallium in smoke particulate from counterfeit cigarettes compared to authentic US brands ». *Food and Chemical Toxicology* 45 (2) : 202-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.08.001>.
- Pappas, R. Steve. 2011. « Toxic elements in tobacco and in cigarette smoke: inflammation and sensitization ». *Metallomics* 3 (11) : 1181. <https://doi.org/10.1039/c1mt00066g>.
- Parvez SM, Jahan F, Brune MN, Gorman JF, Rahman MJ, Carpenter D, Islam Z, Rahman M, Aich N, Knibbs LD, Sly PD. 2021. Health consequences of exposure to e-waste: an updated systematic review. *Lancet Planet Health*. 2021 Dec;5(12):e905-e920.
- Pasquereau, A, R Guignard, R Andler, O Le Nézet, S Spilka, I Obradovic, G Airagnes, F Beck, et V Nguyen-Thanh. 2024. « Prévalence du tabagisme en France hexagonale en 2023 parmi les 18-75 ans. Résultats de l'édition 2023 de l'enquête EROPP de l'OFDT. » Le point sur. Saint-Maurice : Santé Publique France. Consulté le 11 février 2025. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/tabac/documents/enquetes-etudes/prevalence-du-tabagisme-en-france-hexagonale-en-2023-parmi-les-18-75-ans>.
- Pasquereau, Anne, Romain Guignard, Raphaël Andler, et Viêt Nguyen-Thanh. 2025. « Tabagisme : usage, envie d'arrêter et tentatives d'arrêt. Baromètre de Santé publique France : résultats de l'édition 2024. » Dans Baromètre de Santé publique France : résultats de l'édition 2024. . Saint-Maurice : Santé Publique France. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/tabac/documents/rapport-synthese/tabagisme-usage-envie-d-arreter-et-tentatives-d-arret.-barometre-de-sante-publique-france-resultats-de-l-edition-2024>.
- Pawson, Ray, Trisha Greenhalgh, Gill Harvey, et Kieran Walshe. 2005. « Realist review--a new method of systematic review designed for complex policy interventions ». *Journal of Health Services Research & Policy* 10 Suppl 1 (juillet) : 21-34. <https://doi.org/10.1258/1355819054308530>.
- Pesce G, Sesé L, Calciano L, Travert B, Dessimond B, Maesano CN, Ferrante G, Huel G, Prud'homme J, Guinot M, Soomro MH, Baloch RM, Lhote R, Annesi-Maesano I. 2021. Foetal exposure to heavy metals and risk of atopic diseases in early childhood. *Pediatr Allergy Immunol*. 2021 Feb;32(2):242-250. doi: 10.1111/pai.13397. Epub 2020 Nov 6. PMID: 33091176.
- Peters, Micah D. J., Casey Marnie, Heather Colquhoun, Chantelle M. Garritty, Susanne Hempel, Tanya Horsley, Etienne V. Langlois, et al. 2021. « Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application ». *Systematic Reviews* 10 (1) : 263. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01821-3>.
- Philipon, Patrick. 2020. « Epandage des boues de STEP : vers une hygiénisation généralisée ? » *Revue EIN*. 30 décembre 2020. <https://www.revue-ein.com/article/boues-d-epuration-et-matieres-fertilisantes-comment-favoriser-la-valorisation>.
- Piadé, J. -J., G. Jaccard, C. Dolka, M. Belushkin, et S. Wajrock. 2015. « Differences in cadmium transfer from tobacco to cigarette smoke, compared to arsenic or lead ». *Toxicology Reports* 2 (janvier) : 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2014.11.005>.

- Piluso, Nicolas. 2017. « La concertation sur les risques industriels : une modélisation ». <https://univ-tlse2.hal.science/hal-01448420>.
- Pizzol, Massimo, James C.R. Smart, et Marianne Thomsen. 2014. « External costs of cadmium emissions to soil: a drawback of phosphorus fertilizers ». *Journal of Cleaner Production* 84 (décembre) : 475-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.080>.
- Plateforme SCA. 2023. « Surveillance du Cadmium dans la chaîne alimentaire: rapport final du groupe de travail ». Plateforme de la surveillance de la chaîne alimentaire (SCA). Consulté le 29 juillet 2025. https://www.plateforme-sca.fr/sites/default/files/inline-files/GT%20cadmium_Rapport_VF_0.pdf.
- Puisney-Dakhli Chloé, Oikonomou Evdokia K., Tharaud Mickaël, Sivry Yann, Berret Jean-François, Baeza-Squiban Armelle,(2023). Effects of brake wear nanoparticles on the protection and repair functions of the airway epithelium, *Environmental Pollution*, Volume 327, 2023, 121554, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121554>.
- Rautela R., Arya S., Vishwakarma S., Lee J., Kim K-H, Kumar S. 2021. E-waste management and its effects on the environment and human health, *Science of The Total Environment*, Volume 773, 2021, 145623.
- Rebeniak M, Wojciechowska-Mazurek M, Mania M, Szydal T, Strzelecka A, Starska K.2014. Exposure to lead and cadmium released from ceramics and glassware intended to come into contact with food. *Rocz Panstw Zakl Hig.* 2014;65(4):301-9. PMID: 25526575.
- Rempelos, L., M. Baranski, J. Wang, T.N. Adams, K. Adebuseyi, J.J. Beckman, C.J. Brockbank, et al. 2021. « Integrated soil and crop management in organic agriculture: A logical framework to ensure food quality and human health? » *Agronomy* 11 (12). <https://doi.org/10.3390/agronomy11122494>.
- Richter, Patricia, Obaid Faroon, et R. Steven Pappas. 2017. « Cadmium and Cadmium/Zinc Ratios and Tobacco-Related Morbidities ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (10) : 1154. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101154>
- Ring Caroline L., Pearce Robert G., Setzer R. Woodrow, Wetmore Barbara A., Wambaugh John F. 2017. Identifying populations sensitive to environmental chemicals by simulating toxicokinetic variability, *Environment International*, Volume 106, 2017, Pages 105-118, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.004>.
- Roberts, Terry L. 2014. « Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science ». *Procedia Engineering*, SYMPHOS 2013 - 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry, 83 (janvier) : 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.012>.
- Rodríguez-Barranco M, Lacasaña M, Gil F, Lorca A, Alguacil J, Rohlman DS, et al. 2014. Cadmium exposure and neuropsychological development in school children in southwestern Spain. *Environ Res.* 134, 66-73.
- Ruoyu Wang et al. 2023. Review. Cadmium in food: Source, distribution and removal. *Food Chemistry* 405 -134666
- Rys, G, et on behalf of the Cadmium Management Group. 2020. « Cadmium and New Zealand Agriculture and Horticulture: a Refreshed Strategy for Long-Term Risk Management ». Dans *Nutrient Management in Farmed Landscapes*. Sous la direction de C.L. Christensen, D.J. Horne, et R. Singh, Farmed Landscapes Research Centre, Massey

- University, Palmerston North, New Zealand. Occasional Report No. 33. https://flrc.massey.ac.nz/workshops/20/Manuscripts/Paper_Sneath_2020.pdf.
- Samrane, Kamal. 2023. « Procédés intensifiés et intégrés pour l'élimination du cadmium de l'acide phosphorique industriel, une réponse technologique à la chimie verte ». Rabat : Université Mohammed V - Faculté des Sciences. <http://toubkal.imist.ma/handle/123456789/33356>.
- Samrane, Kamal, Mohammad Latifi, Mohammad Khajouei, et Ahmed Bouhaouss. 2023. « Comprehensive analysis and relevant developments of cadmium removal technologies in fertilizers industry ». *Minerals Engineering* 201 (octobre) : 108189. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108189>.
- Santé Canada. 2020. « Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – cadmium ». Éducation et sensibilisation. Consulté le 11 février 2025. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-cadmium.html>.
- Santé Publique France. 2019. « Sols ». 2019. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/sols>.
- Santé Publique France. 2021. « Imprégnation de la population française par les métaux et métalloïdes. Programme national de biosurveillance. Esteban 2014-2016. » Saint-Maurice : Santé Publique France. Consulté le 24 janvier 2023. <https://www.santepubliquefrance.fr/import/impregnation-de-la-population-francaise-par-les-metaux-et-metalloides.-programme-national-de-biosurveillance.-esteban-2014-2016>.
- Santé Publique France. 2025. « Tabac: données ». 2025. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/tabac>.
- Santé Publique France. 2025b. « Quelles sont les dispositions de lutte contre le tabagisme en France ? » 2025. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/tabac/quelles-sont-les-dispositions-de-lutte-contre-le-tabagisme-en-france>.
- Santé Publique France, et Observatoire français des drogues et des tendances addictives (ODFT). 2024. « L'approvisionnement en tabac des fumeurs en France, 2014-2022 ». https://www.ofdt.fr/sites/ofdt/files/2024-05/cp_approvisionnement_tabac_2022.pdf.
- Schädel, S., Diemer, J., Köhler, J.; Schredderanlagen und Abfalldeponienrelevante Sekundärquellen für dioxin-ähnliche PCB und verwandte persistente Schadstoffe; Bayerisches Landesamt für Umwelt; Augsburg; 2009.
- Schaefer, Heather R., Sherri Dennis, et Suzanne Fitzpatrick. 2020. « Cadmium: Mitigation strategies to reduce dietary exposure. » *Journal of food science* 85 (2) : 260-67. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14997>.
- science.org. 2018. « European Union debates controversial plans to limit cadmium in fertilizer ». 2018. <https://www.science.org/content/article/european-union-debates-controversial-plans-limit-cadmium-fertilizer>.
- Singh, Anuradha, Shraddha Chauhan, Sunita Varjani, Ashok Pandey, et Preeti Chaturvedi Bhargava. 2022. « Integrated approaches to mitigate threats from emerging potentially toxic elements: A way forward for sustainable environmental management. » *Environmental research* 209 (juin) : 112844. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112844>.

- Six, L., et E. Smolders. 2014. « Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils ». *Science of The Total Environment* 485-486 (juillet) : 319-28. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.109>.
- Sneath, G, et on behalf of the Cadmium Management Group. 2020. « Revision of the Tiered Fertiliser Management System for Soil Cadmium ». Dans *Nutrient Management in Farmed Landscapes*. Sous la direction de C.L. Christensen, D.J. Horne, et R. Singh, Farmed Landscapes Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. Occasional Report No. 33. https://flrc.massey.ac.nz/workshops/20/Manuscripts/Paper_Sneath_2020.pdf.
- Sripada, Kam, et Adrian Madsen Lager. 2022. « Interventions to reduce cadmium exposure in low- and middle-income countries during pregnancy and childhood: A systematic review ». *Journal of Global Health* 12 (novembre) : 04089. <https://doi.org/10.7189/jogh.12.04089>.
- Sterckeman, Thibault. 2018. « Trop de cadmium dans les engrais français ? » The Conversation. 2 juillet 2018. <http://theconversation.com/trop-de-cadmium-dans-les-engrais-francais-98343>.
- Sterckeman, Thibault, Lucas Gossiaux, Sophie Guimont, Catherine Sirguey, et Zhongbing Lin. 2018. « Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century ». *Science of The Total Environment* 639 (octobre) : 1440-52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.225>.
- Sterckeman, Thibault, et Markus Puschenreiter. 2021. « Phytoextraction of Cadmium: Feasibility in Field Applications and Potential Use of Harvested Biomass ». Dans *Agromining: Farming for Metals*. Sous la direction de Antony Van Der Ent, Alan J.M. Baker, Guillaume Echevarria, Marie-Odile Simonnot, et Jean Louis Morel, 323-39. Mineral Resource Reviews. Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58904-2_15.
- Suciu, N.A., R. De Vivo, N. Rizzati, et E. Capri. 2022. « Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health? » *Current Opinion in Environmental Science and Health* 30. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>.
- Sughis M, Penders J, Haufroid V, Nemery B, Nawrot TS. 2011. Bone resorption and environmental exposure to cadmium in children: a cross-sectional study. *Environ Health*. 2011 Dec 8; 10:104. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-104>
- Sun H, Chen W, Wang D, Jin Y, Chen X, Xu Y. 2014. The effects of prenatal exposure to low-level cadmium, lead and selenium on birth outcomes. *Chemosphere*. 2014 Aug; 108:33-9.
- Tratnik, Janja Snoj, David Kocman, Milena Horvat, Anna-Maria Andersson, Anders Juul, Eva Jacobsen, Kristin Ólafsdóttir, et al. 2022. « Cadmium exposure in adults across Europe: Results from the HBM4EU Aligned Studies survey 2014–2020 ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 246 (septembre) : 114050. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.114050>.
- Travis, Nargiz, Marie Knoll, Steven Cook, Hayoung Oh, Christopher J. Cadham, Luz María Sánchez-Romero, et David T. Levy. 2023. « Chemical Profiles and Toxicity of Electronic Cigarettes: An Umbrella Review and Methodological Considerations. » *International journal of environmental research and public health* 20 (3). <https://doi.org/10.3390/ijerph20031908>.

- Ulrich, Andrea E. 2019. « Cadmium governance in Europe's phosphate fertilizers: Not so fast? » *Science of The Total Environment* 650 (février) : 541-45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.014>.
- UNEP. 2010. « Final review of scientific information on cadmium | UNEP - UN Environment Programme ». Consulté le 11 février 2025. <https://www.unep.org/resources/report/final-review-scientific-information-cadmium>.
- UNEP. 2020. « An Assessment Report on Issues of Concern: Chemicals and Waste Issues Posing Risks to Human Health and the Environment ». Consulté le 11 février 2025. <https://www.unep.org/resources/report/assessment-report-issues-concern-chemicals-and-waste-issues-posing-risks-human>.
- Unité de la prospective scientifique (STOA), Direction de l'Évaluation de l'impact et de la Valeur ajoutée européenne, et Direction générale des services de recherche parlementaire. 2016. « L'agriculture de précision et l'avenir de l'agriculture en Europe. Étude de prospective scientifique. » [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU\(2016\)581892_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_FR.pdf).
- United Nations Treaty Collection (UNTC). 1983. « Convention on long-range transboundary air pollution ». 1983. https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-1&chapter=27&clang=_en.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2023. « China Releases the Standard for Maximum Levels of Contaminants in Foods ». CH2023-0040. USDA. Consulté le 26 mars 2025. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=China%20Releases%20the%20Standard%20for%20Maximum%20Levels%20of%20Contaminants%20in%20Foods_Beijing_China%20-%20People%27s%20Republic%20of_CH2023-0040.pdf.
- U.S. Geological Survey. 2025. « U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Phosphate rock. » <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-phosphate.pdf>.
- Vanacker Marie, Tressou Jessica, Perouel Guillaume, Glorennec Philippe, Crépet Amélie. 2020. Combining data from heterogeneous surveys for aggregate exposure: Application to children exposure to lead in France, *Environmental Research*, Volume 182, 2020, 109069, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109069>
- Verbeeck, Mieke, Peter Salaets, et Erik Smolders. 2020. « Trace element concentrations in mineral phosphate fertilizers used in Europe: A balanced survey ». *Science of The Total Environment* 712 (avril) : 136419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136419>.
- Vidal, Agathe. 2024. « La fertilisation soufrée est-elle un levier efficace pour limiter le transfert sol-grain du cadmium chez le blé dur ? » Université de Bordeaux. <https://theses.fr/s352014>.
- Wallin M, Barregard L, Sallsten G, Lundh T, Karlsson MK, Lorentzon M, Ohlsson C, Mellström D. 2016. Low-Level Cadmium Exposure Is Associated With Decreased Bone Mineral Density and Increased Risk of Incident Fractures in Elderly Men: The MrOS Sweden Study. *J Bone Miner Res*. 2016 Apr; 31(4):732-41.

- Wang, Ruoyu, Panting Sang, Yahui Guo, Ping Jin, Yuliang Cheng, Hang Yu, Yunfei Xie, Weirong Yao, et He Qian. 2023. « Cadmium in food: Source, distribution and removal ». *Food Chemistry* 405 (mars) : 134666. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134666>.
- Wavreille, Alexandre, et Benoît Van Massenhove. 2023. « Optimisation de la production d'acide phosphorique pour les engrais ». présenté à 16èmes Rencontres Comifer-Gemas, Tours, novembre. <https://comifer.asso.fr/evenements/actes-des-rencontres-comifer-gemas/16e-rencontres-de-la-fertilisation-raisonnee/posters-2023/>.
- Wester RC, Maibach HI, Sedik L, et al. 1992. In vitro percutaneous absorption of cadmium from water and soil into human skin. *Fundam Appl Toxicol* 19:1-5.
- World Health Organization Regional Office for Europe. 2000. « Air quality guidelines for Europe, 2nd edition ». WHO. Consulté le 11 février 2025. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289013581>.
- World Health Organization (WHO). 2015. « WHO study group on tobacco product regulation: report on the scientific basis of tobacco product regulation: fifth report of a WHO study group ». Consulté le 11 février 2025. <https://iris.who.int/handle/10665/161512>.
- World Health Organization (WHO). 2018. « Tobacco product regulation: basic handbook ». Consulté le 8 octobre 2025. <https://www.who.int/publications/i/item/tobacco-product-regulation-basic-handbook>.
- World Health Organization (WHO). 2021. *Health Promotion Glossary of Terms 2021*. 1st ed. Geneva : World Health Organization.
- Xie J, Marano KM, Wilson CL, Liu H, Gan H, Xie F, Naufal ZS. 2012. A probabilistic risk assessment approach used to prioritize chemical constituents in mainstream smoke of cigarettes sold in China. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2012 Mar;62(2):355-62. doi: 10.1016/j.yrtph.2011.10.017. Epub 2011 Nov 6. PMID: 22085590.
- Yu, Hanjing, Chenchen Li, Jin Yan, Yaoqiang Ma, Xinyu Zhou, Wanquan Yu, Huiying Kan, Qi Meng, Ruosong Xie, et Peng Dong. 2023. « A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil ». *RSC Advances* 13 (6) : 3505-19. <https://doi.org/10.1039/D2RA07095B>.
- Yuan Z, Luo T, Liu X, Hua H, Zhuang Y, Zhang X, Zhang L, Zhang Y, Xu W, Ren J. 2019. Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution. *Sci Total Environ*. 2019 Aug 1;676:87-96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.250. Epub 2019 Apr 19. PMID: 31029903.
- Yue et al. 2024. Penicillium oxalicum induced phosphate precipitation enhanced cadmium immobilization by simultaneously accelerating Cd biosorption and biomineralization. *Journal of Hazardous Materials* 470 (2024) 134306.
- Yuling Liu et al. 2025. A new insight into the straw decomposition associated with minerals: Promoting straw humification and Cd immobilization. *journal of environmental sciences* 148, 553–566.
- Zhai, Q., A. Narbad, et W. Chen. 2015. « Dietary strategies for the treatment of cadmium and lead toxicity ». *Nutrients* 7 (1) : 552-71. <https://doi.org/10.3390/nu7010552>.
- Zhao, Di, Atul Aravindakshan, Markus Hilpert, Pablo Olmedo, Ana M. Rule, Ana Navas-Acien, et Angela Aherrera. 2020. « Metal/Metalloid Levels in Electronic Cigarette Liquids, Aerosols, and Human Biosamples: A Systematic Review ». *Environmental Health Perspectives* 128 (3) : 36001. <https://doi.org/10.1289/EHP5686>.

- Zhao, Fang-Jie, Zhong Tang, Jia-Jun Song, Xin-Yuan Huang, et Peng Wang. 2022. « Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. » *Molecular plant* 15 (1): 27-44. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.09.016>.
- Zhou, Min, et Zhengguo Li. 2022. « Recent Advances in Minimizing Cadmium Accumulation in Wheat ». *Toxics* 10 (4) : 187. <https://doi.org/10.3390/toxics10040187>.
- Zhong Xueqian, Jacobsohn Antoine, Dufour Christine, Schwartz Christophe, Sterckeman Thibault, (2024). Evaluating a mass balance model for soil trace metals using the historical data from the King's Kitchen Garden (Versailles, France), *Journal of Hazardous Materials*, Volume 465, 2024, 133259, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133259>.

10.2 Normes

AFNOR. 2003. NF X 50-110 *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. AFNOR (indice de classement X 50-110).

ISO (International Organization for Standardization). 1997. *Information and Documentation - Rules for the Abbreviation of Title Words and Titles of Publications*. ISO 4:1997. Paris: ISO.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine



2023-AUTO-0150



Décision n°2023-125

AUTOSAISINE

Le directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses),

Vu le code de la santé publique, et notamment son article L. 1313-3 conférant à l'Anses la prérogative de se saisir de toute question en vue de l'accomplissement de ses missions,

Décide :

Article 1^{er} : L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail se saisit afin de réaliser une expertise dont les caractéristiques sont listées ci-dessous.

1.1 Thématiques et objectifs de l'expertise

Autosaisine relative à la priorisation des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium selon une approche d'exposition agrégée.

L'objectif de l'autosaisine est une réévaluation de l'exposition au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition, visant à identifier des leviers d'action prioritaires à mettre en place par les gestionnaires, qui permettront de diminuer l'imprégnation.

1.2 Contexte de l'autosaisine

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique omniprésent dans l'environnement (sol, air, eau, sédiment). Le cadmium a une origine naturelle et anthropique (rejeté par les activités agricoles et industrielles). Reconnu cancérigène, mutagène et toxique pour la reproduction, le cadmium entraîne notamment chez l'humain des atteintes rénales et une fragilité osseuse lors d'une exposition prolongée, notamment par voie orale. La population générale est exposée essentiellement par l'alimentation, hors tabagisme. Chez les fumeurs, la consommation de 20 à 40 cigarettes par jour peut augmenter l'exposition globale au cadmium de 15 à 30%. Par ailleurs, certains professionnels peuvent constituer une population spécifiquement exposée au cadmium (par exemple, dans les manufactures de batteries de Ni-Cd).

Biosurveillance et exposition alimentaire : une surexposition de la population française

Dans son étude Esteban (Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition) publiée en 2021, Santé publique France indique que les imprégnations en cadmium mesurés chez les adultes français étaient plus élevées que ceux mesurés dans la précédente étude de biosurveillance française (ENNS, 2006-2007). Des dépassements de la valeur guide sanitaire du cadmium recommandée par l'Anses en 2019 ont été observés au sein de la population de l'étude Esteban. En effet, près de la moitié de la population adulte française excède la concentration critique de cadmium urinaire de 0,5 µg.g⁻¹ de créatinine établie par l'Anses sur la base des effets osseux.



Les engrais minéraux phosphatés, source majeure de Cd dans les sols agricoles

Les intrants agricoles par l'épandage d'engrais, d'effluents d'élevage ou de boues ainsi que les dépôts atmosphériques constituent des sources d'entrées en cadmium dans les sols agricoles. Les engrais minéraux phosphatés sont identifiés comme une source majeure d'apport en cadmium dans les sols agricoles français. En 2019, l'Anses a recommandé des limites en cadmium dans les matières fertilisantes afin de limiter la contamination des sols, et des productions agricoles en vue de réduire l'exposition du consommateur. Une réglementation européenne entrée en vigueur en juillet 2022 a introduit la fixation de seuils en cadmium dans les matières fertilisantes. En France, un projet de décret de socle commun pour l'innocuité des matières fertilisantes est en cours d'élaboration.

De nombreuses saisines sur le sujet du cadmium dans les aliments

Ces dernières années, l'Anses a instruit plusieurs saisines pour répondre à des demandes de proposition de teneurs maximales en cadmium dans des aliments, notamment dans les algues alimentaires, ou les bulots. L'exercice a montré la difficulté à identifier un seuil sanitaire pour ce contaminant pour lequel les EAT et les études d'imprégnation ont conclu à une préoccupation sanitaire.

Problématique

Face à une situation de forte exposition alimentaire et de forte imprégnation de la population française par le cadmium, la réévaluation de l'exposition au cadmium à partir de différentes sources et voies d'exposition apparaît essentielle. Cette réévaluation vise à identifier des leviers d'action prioritaires à mettre en place par les gestionnaires, qui permettront de diminuer l'imprégnation. Faut-il agir sur une source alimentaire particulière ou le dernier entrant (ex. algues, bulots), sur les sources environnementales (ex. engrais, sols) ou toute autre source (ex. tabagisme) ?

Démarche envisagée

Dans une approche exposome, il aurait été souhaitable de s'intéresser à l'ensemble des voies, sources et contextes d'exposition (y compris les travailleurs, poussières intérieures, etc.) mais dans un souci d'optimisation des ressources internes à l'Anses, il a été décidé de se focaliser dans un premier temps sur la population générale et l'alimentation, en prenant en compte le tabagisme.

La démarche s'appuiera sur une évaluation des différentes sources (spécifiquement l'alimentation et le tabac) du cadmium pouvant contribuer à l'imprégnation humaine à ce contaminant.

A cette fin, l'exposition agrégée au cadmium pour la population générale française sera estimée à partir des différentes sources (ensemble des aliments, eau, tabac) et voies d'exposition (ingestion et inhalation) retenues. Il s'agira de caractériser l'exposition en reliant les doses externes et leur transfert depuis leurs sources aux doses internes en s'appuyant sur la modélisation de la cinétique du sol à la plante et de la toxicocinétique dans le corps humain à l'aide de modèles PBK. L'exposition agrégée au cadmium sera estimée pour la population générale (infantile 0-3 ans, enfants et adultes, fumeurs et non-fumeurs). Les travaux d'expertise constitueront les premiers éléments nécessaires au développement d'une approche exposome. Les travaux n'ont pas vocation à réévaluer les valeurs sanitaires de référence liées au cadmium pour la population générale.

L'approche développée permettra par la décomposition de toutes les sources alimentaires d'identifier celles contribuant le plus largement à l'exposition totale. Ces éléments contribueront ainsi à apprécier l'impact de mesure(s) de gestion liées à ces sources sur l'imprégnation de la population générale française et à identifier les leviers d'action à prioriser.

En complément de l'évaluation des risques sanitaires, l'analyse socio-économique de différentes mesures de maîtrise du risque sera un appui à l'évaluation des leviers d'action et d'analyse de différentes options de gestion.

Articulation de ces travaux avec le projet européen PARC

Ces travaux s'intègrent dans la tâche T6.2 sur le développement d'une approche intégrée pour l'évaluation de l'exposition et du risque du workpackage WP6 « Innovation en évaluation réglementaire du risque » du « partenariat européen pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques » (PARC), financé dans le cadre de « Horizon Europe ». Ils bénéficieront des approches développées dans le cadre des projets de cette tâche, en particulier les



projets P6.2.1a « Source-to-dose » et P6.2.1b « Aggregate exposure ». Spécifiquement, les travaux de cette autosaisine représenteront un cas d'étude dans le projet P6.2.1a « source-to-dose » où le modèle cinétique du sol à la plante existant pour le cadmium sera amélioré et optimisé dans l'optique de combiner des expositions provenant de différentes sources en une exposition agrégée. Ce projet est connecté au projet P6.2.1b « Aggregate exposure » qui permettra de développer la stratégie pour la mise en œuvre d'une exposition agrégée au cadmium à partir des différentes sources et voies d'exposition, en considérant pour PARC la population générale et professionnelle. L'approche développée dans le projet P6.2.1b « Aggregate exposure » sera un appui pour la hiérarchisation des principales sources et voies d'exposition à cette autosaisine. L'approche exposome appliquée au cadmium (incluant l'exposition professionnelle) sera développée dans ce partenariat européen PARC.

1.3 Questions sur lesquelles portent les travaux d'expertise à mener

Pour répondre aux objectifs de l'autosaisine, les étapes suivantes sont identifiées :

1. Identifier et évaluer les expositions par source et voie d'exposition.
2. Estimer l'exposition agrégée au cadmium de la population française à partir des sources et voies retenues et en reliant les modèles existant sur la cinétique du sol à la plante et sur la toxicocinétique dans le corps humain (PBK).
3. Évaluer la contribution des différentes sources de cadmium à la cadmiurie en reliant les modèles cinétiques, pour évaluer les expositions internes. A l'aide d'analyses de sensibilité, l'impact d'une modification des paramètres d'entrée (concentration dans les engrais, contamination des aliments, consommation alimentaire, quantité de cadmium dans les cigarettes et tabagisme, etc.) sur la cadmiurie sera testé.
4. Identifier les sources et voies majoritairement contributrices à l'exposition afin de prioriser des leviers d'action pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.
5. Identifier et analyser les options de mesures de maîtrise du risque à l'aide d'une analyse socio-économique.
6. Émettre des recommandations relatives aux leviers d'action à prioriser pour réduire l'imprégnation de la population française au cadmium.

1.4 Durée prévisionnelle de l'expertise

15 mois, avec une année effective de travail avec le groupe de travail GT (en prenant en compte le temps de l'appel à candidatures et de la mise en place du groupe de travail).

Article 2. - Un avis sera émis et publié par l'Agence à l'issue des travaux.

Fait à Maisons-Alfort, le **02 AOUT 2023**

Pour le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du travail
et par délégation
Le Directeur général délégué
en charge du Pôle Sciences pour l'expertise


Matthieu SCHULER

Pr Benoît VALLET
Directeur général

Annexe 2 : Critères de recherche associées à la revue bibliographique liée à l'identification des sources et voies d'exposition au cadmium

Cette annexe présente les critères utilisés pour la recherche de données liées aux différentes sources de cadmium dans le cadre de la revue de la littérature conduite dans le chapitre 4.

❖ Sols

Trois bases de données (Web of Knowledge, PubMed et HAL) ont été consultées pour collecter les informations relatives au fond pédo-géochimique et aux teneurs en cadmium dans les sols agricoles.

Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été définis en suivant l'approche PECOTS* afin d'obtenir une sélection de publications.

Thématiques	Critères
Sujets étudiés	Sols
Exposition ciblée	Cadmium
Comparateur scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Non applicable
Résultat d'intérêt	Concentration en cadmium mesurée dans les sols
Temporalité (période de recherche)	Pas d'exclusion
Localisation	France, puis dans un second temps, recherche élargie au monde entier

* Structure recommandée pour une recherche bibliographique en tenant compte de critères relatifs à la population étudiée (P), l'exposition (E), le comparateur (C), le résultat d'intérêt ou *outcome* (O), la temporalité (T), la localisation ou *setting* (S)

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- absence de données chiffrées concernant le cadmium dans l'article,
- absence de données spécifiques au fond géochimique ou aux concentrations dans les sols
- langue autre que l'anglais ou le français,
- accès indisponible.

Les critères d'inclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- documents rédigés en français ou en anglais ;
- périmètre lié aux concentrations en cadmium dans les sols ;
- document présentant des données chiffrées.

A l'issue de ces procédures, les doublons ont été éliminés.

Les requêtes suivantes ont été utilisées dans les différentes bases de données :

Web of Knowledge

Dans une première étape ciblée sur les sols français, les requêtes suivantes ont été utilisées :

- TS=cadmium AND (TS=CONCENTRATION OR TS=LEVEL) AND TS=geochemical background AND TS=soil AND TS=FRANCE NOT TS=sediment* NOT TS=stream: 7 entrées
- TS=cadmium AND (TS=CONCENTRATION OR TS=LEVEL) AND TS=farming AND TS=soil AND TS=FRANCE NOT TS=sediment* NOT TS=stream: 25 entrées.

Le dédoublonnage de ces deux recherches a été réalisée avec la requête

- ((TS=cadmium AND (TS=CONCENTRATION OR TS=LEVEL) AND (TS=geochemical background OR TS=farming) AND TS=soil AND TS=FRANCE NOT TS=sediment* NOT TS=stream): 31 entrées.

Après utilisation des critères d'exclusion et d'inclusion, **10 articles ont été retenus**.

Une recherche élargie au monde entier a ensuite été conduite en ne ciblant que les articles de revue avec la requête suivante :

- ((TS=cadmium AND (TS=CONCENTRATION OR TS=LEVEL) AND (TS=geochemical background OR TS=farming) AND TS=soil NOT TS=sediment* NOT TS=stream)) and Preprint Citation Index and Review Article, 57 entrées.

L'utilisation des critères d'exclusion et d'inclusion a permis de retenir **5 articles supplémentaires**.

PubMed

Une requête équivalente a été utilisée

- (((cadmium[Text Word]) AND (soil[Text Word])) AND (geochemical background[Text Word])) AND (concentration[Text Word]): **12 entrées**

Après utilisation des critères d'exclusion et d'inclusion, **2 articles supplémentaires** ont été retenus.

HAL

La base de données HAL a également été utilisée pour repérer des documents de type littérature grise, rédigés en français. Les mots clés [cadmium, sol, France] ont été utilisés. Cette recherche a produit 68 résultats. Après application des critères d'inclusion et d'exclusion, 14 nouveaux documents ont été identifiés.

La consultation des différentes bases a ainsi permis d'identifier 31 documents.

D'autres documents (n= 16) repérés lors de travaux antérieurs ont été également consultés.

❖ Sources agricoles

La base de données Web of Knowledge a été utilisée pour conduire une revue de la littérature afin de collecter les informations relatives aux contaminations des sols en cadmium liées aux principales pratiques agricoles : apports d'engrais phosphatés, épandages d'effluents d'élevage et de boues.

Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été définis en suivant l'approche PECOTS* afin d'obtenir une sélection de publications.

Thématiques	Critères
Sujets étudiés	Sources agricoles
Exposition ciblée	Cadmium
Comparateur scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Non applicable
Résultat d'intérêt	Concentration en cadmium mesurée dans les engrais phosphatés, épandages d'effluents d'élevage et boues
Temporalité (période de recherche)	Pas d'exclusion
Localisation	France, puis dans un second temps, recherche élargie au monde entier

* Structure recommandée pour une recherche bibliographique en tenant compte de critères relatifs à la population étudiée (P), l'exposition (E), le comparateur (C), le résultat d'intérêt ou *outcome* (O), la temporalité (T), la localisation ou *setting* (S)

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- absence de données chiffrées concernant le cadmium dans l'article ;
- langue autre que l'anglais ou le français ;
- accès indisponible.

Les critères d'inclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- documents rédigés en français ou en anglais,
- périmètre lié aux concentrations en cadmium dans les sources agricoles

- document présentant des données chiffrées.

- Concernant la recherche bibliographique relative aux contaminations liées aux épandages d'effluents d'élevage, la requête suivante a été utilisée :
TS=cadmium and TS=soil and TS=manure

Seuls les articles de revue et les plus cités ont été conservés. Après application des critères d'exclusion et d'inclusion, la recherche a produit 6 nouveaux articles.

- Concernant la recherche bibliographique relative aux contaminations liées aux épandages de boues, la requête suivante a été utilisée :
TS=cadmium and TS=soil and TS=sewage sludge

Seuls les articles de revue et les plus cités ont été conservés. Après application des critères d'exclusion et d'inclusion, la recherche a produit 1 nouvel article.

- Concernant la recherche bibliographique relative aux contaminations liées aux épandages d'engrais phosphatés, la requête suivante a été utilisée :
TS=cadmium AND TS=soil AND TS=phosphate fertilizer

Seuls les articles de revue et les plus cités ont été conservés. Après application des critères d'exclusion et d'inclusion, la recherche a produit 6 nouveaux articles.

Au total, **7 articles ont été identifiés**.

Par ailleurs, différents documents (n = 16) repérés lors de travaux antérieurs¹³⁸ ont été également consultés.

❖ Sources industrielles

Une recherche étendue a été conduite pour les sources industrielles de cadmium dans l'environnement à partir de Google et Science direct (Elsevier), comme présenté dans le tableau ci-dessous. Une attention a été portée sur la date de parution des articles, en privilégiant les articles récents, en particulier sur le sujet des techniques mobilisées pour réduire le risque en accord avec la logique du règlement national des ICPE qui impose de mobiliser les meilleures techniques disponibles (MTD). En plus des informations très ciblées sur les sources de cadmium, les articles de rang A obtenus grâce à la recherche dans Science direct ont été étudiés afin de collecter des informations précises sur les méthodes qui réduisent les risques telles que l'épandage de biochars ou autres produits adsorbant qui immobilisent le cadmium.

Plateforme	

¹³⁸ Anses. 2019. Avis de l'ANSES et rapports d'expertise relatifs à l'exposition au cadmium – révision de valeur toxicologique de référence par ingestion et de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques et proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions végétales et l'exposition alimentaire - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort. <https://www.anses.fr/fr/content/exposition-au-cadmium-l%E2%80%99ANSES-propose-des-valeurs-limites-pour-mieux-prot%C3%A9ger-les>

Google	Mots clefs : cadmium, sources, Reach, ICPE, pollution, émissions
Science direct (Elsevier)	Accès au texte intégral de plus de 2 400 revues publiées par Elsevier, Academic Press, Pergamon, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), North Holland, Gauthier Villard spécialisées en chimie, environnement, informatique, ingénierie, mathématiques, physique, sciences des matériaux, sciences de la terre, sciences de la vie, sciences vétérinaires et statistiques.

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- absence de données chiffrées concernant le cadmium dans l'article ;
- langue autre que l'anglais ou le français ;
- accès indisponible.

Les critères d'inclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- documents rédigés en français ou en anglais ;
- périmètre lié aux concentrations en cadmium dans les sources agricoles ;
- document présentant des données chiffrées.

❖ Sources liées aux transports

Deux bases de données (Web of Science, PubMed) ont été consultées pour collecter les informations relatives aux sources liées aux transports

Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été définis en suivant l'approche PECOTS afin d'obtenir une sélection de publications.

Thématiques	Critères
Population	Populations urbaines et rurales exposées à des émissions de Cd provenant des transports.
Exposition ciblée	Exposition aux particules en suspension contenant du Cd, résultant de différentes sources de transport.
Comparateur scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Comparaison entre zones à forte densité de trafic et zones moins exposées.
Résultat d'intérêt	Concentrations de Cd dans l'air et dans les sols adjacents aux infrastructures routières.
Temporalité (période de recherche)	Émissions actuelles versus historiques
Localisation	France Environnements urbains, périurbains et ruraux, avec une attention particulière aux zones agricoles proches des infrastructures routières.

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- absence de données chiffrées concernant le cadmium dans l'article,
- langue autre que l'anglais ou le français,
- accès indisponible.

Les critères d'inclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- documents rédigés en français ou en anglais,
- périmètre lié aux concentrations en cadmium dans les sources de transport
- document présentant des données chiffrées.

A l'issue de ces procédures, les doublons ont été éliminés.

En parallèle, les rapports issus d'agences de santé publique ont été consultés pour identifier les études pertinentes.

❖ Sources liées aux matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA)

Les informations relatives aux MCDA ont été collectées en tant que source ou voie d'exposition potentielle de l'Homme au cadmium.

La recherche a été réalisée sur la France puis sans restriction géographique, au vu du faible nombre de références identifiées et considérant que les MCDA utilisés en France peuvent être de provenance mondiale. Les bases de données consultées sont Scopus et PubMed, selon la requête ci-dessous :

Article title, abstract, keywords :
food AND material AND contact AND cadmium

A la suite de cette étape de recherche, puis de la suppression des doublons, des critères d'inclusion et d'exclusion ont été définis en suivant l'approche PECOTS* afin d'obtenir une sélection de publications.

Thématiques	Critères
Population	Population générale
Exposition ciblée	Cadmium
Comparateur scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Non concerné
Résultat d'intérêt	Concentration mesurée dans les MCDA
Temporalité (Périodes de recherche)	Post 2014
Localisation	France et monde

* Structure recommandée pour une recherche bibliographique en tenant compte de critères relatifs à la population étudiée (P), l'exposition (E), le comparateur (C), le résultat d'intérêt ou *outcome* (O), la temporalité (T), la localisation ou *setting* (S)

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- Absence de données en cadmium dans l'article ;
- Absence de données spécifiques aux MCDA ;
- Article autre qu'en anglais.

Quant aux critères d'inclusion définis pour la sélection des articles, ces derniers sont les suivants :

- articles écrits en français et en anglais couvrant la période de 2014 à 2024 ;
- périmètre de l'article lié aux MCDA ;
- article présentant des données en cadmium.

L'extraction a permis d'identifier 125 documents. Au total, **18 articles ont été retenus**, compte tenu des critères d'inclusion/exclusion et de la suppression des doublons, auxquels ont été ajoutés **15 références issues d'autres sources** telles que la littérature grise ainsi que la réglementation.

❖ Sources liées aux produits du tabac

La base de données Pubmed a été utilisée pour conduire une revue de la littérature afin de collecter les informations relatives aux teneurs en cadmium dans les produits du tabac à fumer. Des critères d'inclusion et d'exclusion ont été définis en suivant l'approche PECOTS* afin d'obtenir une sélection de publications.

Thématiques	Critères
Population	Population générale fumeuse
Exposition ciblée	Cadmium
Comparateur scénario de référence contre lequel la population exposée est comparée	Population non-fumeuse
Résultat d'intérêt	Concentration mesurée dans le tabac, variabilité entre les fabricants / marques / pays
Temporalité (Périodes de recherche)	2005-2025
Localisation	France et monde

* Structure recommandée pour une recherche bibliographique en tenant compte de critères relatifs à la population étudiée (P), l'exposition (E), le comparateur (C), le résultat d'intérêt ou *outcome* (O), la temporalité (T), la localisation ou *setting* (S)

Les critères d'exclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- absence de données chiffrées concernant le cadmium dans les produits du tabac ;
- langue autre que l'anglais ou le français ;
- accès indisponible.

Les critères d'inclusion définis pour la sélection des articles sont les suivants :

- documents rédigés en français ou en anglais ;

- section de résultats dédiée aux concentrations en cadmium dans les produits du tabac ;
- document présentant des données chiffrées.

La base de données PubMed a été consultée, selon la requête ci-dessous :

Article title / abstract :

cadmium AND (tobacco OR cigarett*) AND brand

Parmi les 61 articles inventoriés, 11 articles ont été sélectionnés. A des fins de synthèse, une attention particulière a été accordée aux articles présentant une revue des teneurs en cadmium dans le tabac commercialisés dans différents pays, au cours du temps dans un même pays ou selon différentes marques (cités dans le texte). Les autres articles ont néanmoins été consultés afin de vérifier si leurs principaux résultats différaient notablement des valeurs déjà repérées.

Une recherche à partir des mêmes mots-clés a été lancée sur Google, à titre complémentaire. Elle a permis d'identifier 4 articles d'intérêt potentiel, dont un a été retenu.

L'examen manuel des listes de références bibliographiques a permis d'identifier un autre article d'intérêt et un article de référence (souvent cité) antérieur à 2005. Des travaux relatifs à des problématiques connexes ont aussi été repérés (ex. facteurs de contamination au cadmium du tabac, cadmium dans les cigarettes de contrefaçon).

Par ailleurs, à des fins de contextualisation, des documents d'organismes de référence (ATSDR, OMS, Anses, Santé publique France, OFDT, FranceAgriMer) et des revues de la littérature scientifique sur les facteurs associés à l'exposition au cadmium par les produits du tabac ou du vapotage et ses effets sur la santé ont aussi été pris en compte.

Annexe 3 : paramètres cinétiques du modèle toxicocinétique PBK (d'après Gastellu et al 2025)

Paramètre	Description	Valeur empirique	Minimum	Maximum
K1 cig	Fraction de l'apport par inhalation déposée dans les régions nasopharyngée (NP) et trachéobronchique (TB) due au tabagisme	0,1	0,1	0,2
K1 dust	Fraction de l'apport par inhalation déposée dans les régions NP et TB due à la poussière	0,7	0,4	0,9
K2 cig	Fraction de l'apport par inhalation déposée dans la région pulmonaire due au tabagisme	0,4	0,4	0,6
K2 dust	Fraction de l'apport par inhalation déposée dans la région pulmonaire due à la poussière	0,13	0,1	0,3
K3	Taux de transfert de l'apport par inhalation vers le compartiment d'absorption	0,05	0,01	1
K4	Taux de transfert du cadmium de l'air vers le tractus gastro-intestinal	0,005	0,001	0,1
K5h	Fraction du cadmium dans le tractus gastro-intestinal retenue dans l'épithélium chez l'homme	0,05	0,03	0,1
K5f	Fraction du cadmium dans le tractus gastro-intestinal retenue dans l'épithélium chez la femme	0,1	0,06	0,2
K6	Taux de transfert du cadmium dans le tractus gastro-intestinal vers le compartiment d'absorption	0,05		
K7	Fraction de cadmium libre dans le sang	0,25	0,2	0,4
K8	Masse maximale de cadmium dans le compartiment d'absorption / métallothionéine (µg)	1	0,5	5
K9	Taux de transfert du compartiment sanguin B1 vers les autres tissus	0,44	0,4	0,8
K10	Taux de transfert du cadmium des autres tissus vers le compartiment sanguin B1	0,00014	0,00004	0,0002
K11	Fraction du transfert du cadmium du compartiment sanguin B1 vers les fèces	0,27	0,05	0,5
K12	Fraction du transfert du cadmium du compartiment sanguin B1 vers le foie	0,25	0,1	0,4
K13	Taux de transfert du cadmium du foie vers le compartiment sanguin	0,00003	0	0,0001
K14	Taux de transfert du cadmium du foie vers le compartiment sanguin B3	0,00016	0,0001	0,0003
K15	Taux de transfert du cadmium du foie vers les fèces	0,00005	0	0,0001
K16	Taux de transfert du cadmium du compartiment sanguin B2 vers le sang	0,012	0,004	0,015
K17	Fraction du transfert du cadmium du compartiment sanguin B3 vers les reins	0,95	0,8	0,98
K18	Taux de transfert du cadmium des reins vers le compartiment sanguin	0,00001	0	0,0001

K19	Constante de taux spécifique à l'âge pour le transfert du cadmium des reins vers l'urine	0,00014	0,00002	0,0002
K20	Fraction de cadmium dans les compartiments sanguins B1 + B2 contribuant au cadmium dans le compartiment sanguin B4	0,1		
K21	Augmentation du transfert de cadmium des reins vers l'urine après l'âge de 30 ans	0,0000011	0	0,000002
Kx	Taux de transfert du cadmium de B1 vers le compartiment sanguin B2	0,04	0,01	0,05

Les taux sont exprimés en jours⁻¹.

Annexe 4 : Recherche bibliographique en appui à l'identification d'options d'action

En premier lieu, deux bases de données bibliographiques (Pubmed et Scopus) ont été interrogées en janvier 2023. Les mots-clés pertinents ont été choisis après consultation de quelques revues de littérature identifiées par une recherche simple. L'équation combine les catégories de mots-clés (1) ET (2) ET (3) détaillées dans le tableau ci-dessous :

Mots-clés – (1)	Mots-clés – (2)	Mot-clé – (3)
prevention OR mitigation OR remediation OR decadmiation OR governance OR policy OR regulation OR "risk reduction" OR management	health OR "adverse effects" OR risk OR exposure OR disease	cadmium

Pour tous les mots-clés, la fonction « Text Word » a été utilisée sur Pubmed et la fonction « Title-Abs-Key » a été utilisée sur Scopus. Compte-tenu de l'objectif macroscopique de ce travail, la recherche s'est concentrée sur les revues de littérature (narratives, systématiques, méta-analyses). Un filtre disciplinaire a été appliqué sur Scopus pour mieux cibler la recherche¹³⁹. Un filtre limitant la recherche aux articles en anglais ou en français a également été appliqué. L'équation a conduit à 256 résultats sur Pubmed et 464 résultats sur Scopus.

La sélection a été faite sur lecture du titre et du résumé (voire de l'article entier si nécessaire), en retenant les articles portant sur les mesures de gestion du risque d'exposition de l'Homme au cadmium. A été exclue la littérature spécifique au danger du cadmium pour la santé humaine, à l'établissement de valeurs toxicologiques de référence pour l'Homme, et à l'établissement de valeurs de concentration limite dans les aliments, les sols, les engrais phosphatés ou d'autres sources de cadmium. Par contre, les documents abordant significativement (au moins une section dédiée) l'adoption ou la mise en œuvre de restrictions associées à ces valeurs ou encore à la surveillance de ces valeurs sur le territoire ou auprès de certains publics ont été conservés. Après exclusion des doublons interbases, un total de 267 références ont été conservées. Parmi celles-ci, 22 articles mettant en perspective une diversité de domaines et options d'action ont fait l'objet d'une attention particulière (cf. annexe 5). Des articles scientifiques supplémentaires ont aussi été repérés en s'appuyant sur l'expérience de la coordination, du GT, ou en consultant les listes de références des premiers articles identifiés¹⁴⁰.

Par ailleurs, un recensement des produits d'expertise de l'Anses sur le sujet a été effectué, ainsi que ceux d'autres institutions scientifiques de référence en France (INERIS, BRGM) ou

¹³⁹ Ciblage des sciences de la vie et sciences sociales ((LIMIT-TO SUBJAREA : "ENVI" (environmental science) OR "MEDI" (medicine) OR "AGRI" (Agricultural and biological sciences) OR "EART" (Earth and Planetary sciences) OR "SOC" (social sciences) OR "ECON" (economics, econometrics and finance) OR "HEAL" (health professions) OR "MULT" (multidisciplinary) OR "ARTS" (arts and humanities) OR "PSYC" (psychology)).

¹⁴⁰ En complément d'une recension avec bases de données (ex. PUBMED, SCOPUS), la recherche par « boule de neige » (*snowballing*) consiste à repérer manuellement les citations d'autres documents d'intérêt. Elle permet ainsi d'identifier des références complémentaires dans le cadre d'une synthèse de connaissances (Pawson et al., 2005).

à l'échelle internationale (UNEP, OMS). D'autres documents et des textes de loi ont aussi été identifiés en consultant les listes de référence des documents d'intérêt.

Enfin, une exploration par mots-clés de la base de données Europresse a permis de repérer des articles de presse d'intérêt sur le sujet, des acteurs ayant pris position sur des options d'action, et leurs arguments.

Annexe 5 : Description succincte de publications scientifiques de synthèse initialement identifiées relatives à des options d'action sur le cadmium

Auteurs, date	Objet principal de la publication	Domaines / options d'action identifiés
Anetor et al. 2022	Stress oxydatif associé aux polluants environnementaux (incluant le Cd) : effets sur la vie terrestre, aquatique et la santé humaine.	Collaboration multisectorielle impliquant les secteurs de la protection de l'environnement, l'agriculture et la santé.
Ayangbenro et Babalola 2017	Remédiation des métaux lourds (incluant le Cd) dans des environnements pollués, par biosorption microbienne.	Mécanismes de bioremédiation par des microorganismes et groupes de microorganismes ayant un potentiel de biosorption.
Bair 2022	Contenu en métaux lourds toxiques (incluant le Cd) dans les aliments infantiles et évaluation des politiques publiques aux Etats-Unis.	Enjeux entourant l'établissement de teneurs limites réglementaires dans les aliments, dispositifs d'information / certification, surveillance des denrées.
Bañeras et al. 2022	Métaux dans l'environnement (incluant le Cd) et santé cardiovasculaire : effets sur la santé, prévention, traitement	Réglementation, mesures d'atténuation et contrôle des polluants dans l'air, l'eau, les aliments, traitements à l'échelle individuelle.
Clemens et al. 2013	Exposition alimentaire au cadmium et liens avec le transfert sol-plante du Cd.	Développement d'espèces végétales plus ou moins accumulatrices de Cd (degré de connaissances variable selon les cultures).
Espina et al. 2013	Interventions environnementales / en milieu professionnel pour la prévention des cancers.	Réglementation visant les expositions (valeurs limites, normes industrielles...), incitations à la substitution / élimination de substances, étiquetage obligatoire.
Fan et al. 2022	Facteurs associés aux flux de Cd dans les sols agricoles et stratégies pour protéger leur qualité environnementale.	Standards sur le Cd dans l'air extérieur (dépôts atmosphériques), l'eau d'irrigation, les intrants agricoles, les récoltes issus de sols très contaminés.
Genchi et al. 2020	Effets de la toxicité du Cd sur la santé humaine (focus sur les altérations cellulaires / moléculaires).	Techniques de remédiation du Cd dans les sols et les eaux pollués, le retrait du Cd dans les denrées alimentaires.
Gray et Cavanagh 2021	Connaissances sur le Cd dans les systèmes agricoles en Nouvelle-Zélande.	Gestion de l'accumulation de Cd dans les systèmes agricoles (teneurs limites / normes dans les eaux / sols / aliments, pratiques agricoles, stratégie nationale)
Irfan et al. 2021	Tendances de recherche sur le Cd dans l'eau douce.	Technologies de détection et remédiation / retrait du Cd dans l'eau douce / les eaux usées.
Li et al. 2021	Problèmes de sécurité sanitaire des aliments induits par des pollutions environnementales (incluant les métaux lourds) en Chine.	Description de 4 stades de politiques publiques développées des années 1970 à 2010, mettant de plus en plus l'accent sur la prévention / gestion intégrée, le contrôle.

Maddela et al. 2020	Risques pour la santé humaine et l'économie en lien avec le Cd dans le cacao.	Optimisation des pratiques culturales (amendements, fertilisants), sélection variétale, pratiques de fermentation / fabrication du chocolat, teneurs limites.
Mezynska et al. 2018	Risques pour la santé de la population de l'exposition environnementale au Cd et stratégies de prévention.	Utilisation de composés biologiquement actifs (dérivés de plantes, bioéléments, antioxydants de synthèse...) en prévention secondaire de l'exposition humaine au Cd.
Mng'ong'o et al. 2021	Enjeux de production alimentaire durable liés aux métaux toxiques (incluant le Cd) dans les agroécosystèmes est-africains.	Lignes directrices réglementaires pour l'utilisation d'intrants, indicateurs de qualité agro-environnementale (sols / eaux), adaptation des pratiques agricoles (fertilisation fractionnée, cultures de couverture, réduction du travail du sol...).
Nag et al. 2022	Risques pour la santé humaine et stratégies d'évaluation du risque lié aux métaux pour la santé et l'environnement en Irlande.	Méthodologies disponibles pour évaluer le risque (géo-accumulation, index de pollution, risque écologique, index alimentaire, risque sanitaire), stratégies de phyto-remédiation.
Okereafor et al. 2020	Implications des métaux toxiques pour les sols agricoles, les plantes, les animaux, la vie aquatique et la santé humaine (Afrique du Sud).	Pratiques de stockage des résidus d'exploitations minières.
Schaefer et al. 2020	Stratégies pour réduire l'exposition alimentaire au Cd.	Optimisation des pratiques agronomiques (amendements, sélection variétale, apports de matières fertilisantes, irrigation, recours à la phyto-extraction), agroalimentaires (ustensiles pour fabrication / cuisson / stockage), de consommation (alimentation diversifiée).
Singh et al. 2022	Approches intégrées pour atténuer les menaces liées aux éléments toxiques émergents (tels que les métaux lourds).	Techniques de retrait des éléments toxiques de différents milieux (bioremédiation, phytoremédiation, échanges d'ions, adsorption, charbon actif, nanomatériaux, etc.)
Wang et al. 2015	Contamination des sols en Cd en Chine et évaluation du risque pour la santé.	Appréciation des différences de contamination des sols sur le territoire en vue de mesures de gestion différenciées.
Wimalawansa et Wimalawansa 2016	Facteurs environnementaux associés aux maladies rénales chroniques d'origine multifactorielle (pays tropicaux).	Contrôle de la qualité des intrants agricoles, analyses de sols agricoles et fertilisation raisonnée, formation des producteurs agricoles, engagements RSE des entreprises.
Zhao et al. 2022	Exposition alimentaire au Cd, risques pour la santé humaine, stratégies d'atténuation.	Réduction des émissions industrielles et minières, baisse des apports en Cd par les matières fertilisantes, retrait du Cd / réduction de sa disponibilité dans les sols, sélection de cultivars, réduction de l'absorption dans le corps humain.

Références

- Anetor, G.O., N.L. Nwobi, G.O. Igharo, O.O. Sonuga, et J.I. Anetor. « Environmental Pollutants and Oxidative Stress in Terrestrial and Aquatic Organisms: Examination of the Total Picture and Implications for Human Health ». *Frontiers in Physiology* 13 (2022). <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.931386>.
- Ayangbenro, A.S., et O.O. Babalola. « A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, n° 1 (2017). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
- Bair, E.C. « A Narrative Review of Toxic Heavy Metal Content of Infant and Toddler Foods and Evaluation of United States Policy ». *Frontiers in Nutrition* 9 (2022). <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.919913>.
- Bañeras, Jordi, Josep Iglesias-Grau, María Téllez-Plaza, Vicente Arrarte, Néstor Báez-Ferrer, Begoña Benito, Raquel Campuzano Ruiz, et al. « Environment and cardiovascular health: causes, consequences and opportunities in prevention and treatment. » *Revista espanola de cardiologia (English ed.)* 75, n° 12 (décembre 2022): 1050-58. <https://doi.org/10.1016/j.rec.2022.05.030>.
- Clemens, Stephan, Mark G. M. Aarts, Sébastien Thomine, et Nathalie Verbruggen. « Plant Science: The Key to Preventing Slow Cadmium Poisoning. » *Trends in Plant Science* 18, n° 2 (février 2013): 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>.
- Espina, C., M. Porta, J. Schüz, I.H. Aguado, R.V. Percival, C. Dora, T. Slevin, et al. « Environmental and Occupational Interventions for Primary Prevention of Cancer: A Cross-Sectorial Policy Framework ». *Environmental Health Perspectives* 121, n° 4 (2013): 420-26. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205897>.
- Fan, Tingting, Tao Long, Yuanyuan Lu, Lu Yang, Na Mi, Feiyang Xia, Xiaohan Wang, Shaopo Deng, Qinghua Hu, et Fuwang Zhang. « Meta-Analysis of Cd Input-Output Fluxes in Agricultural Soil. » *Chemosphere* 303, n° Pt 2 (septembre 2022): 134974. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134974>.
- Genchi, G., M.S. Sinicropi, G. Lauria, A. Carocci, et A. Catalano. « The Effects of Cadmium Toxicity ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, n° 11 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>.
- Gray, C.W., et J.-A.E. Cavanagh. « The State of Knowledge of Cadmium in New Zealand Agricultural Systems: 2021 ». *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2022. <https://doi.org/10.1080/00288233.2022.2069130>.
- Irfan, Muhammad, Xianhua Liu, Khalid Hussain, Suraya Mushtaq, Jonnathan Cabrera, et Pingping Zhang. « The Global Research Trend on Cadmium in Freshwater: A Bibliometric Review. » *Environmental Science and Pollution Research International*, 20 avril 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13894-7>.
- Li, Q., K. Zhu, L. Liu, et X. Sun. « Pollution-Induced Food Safety Problem in China: Trends and Policies ». *Frontiers in Nutrition* 8 (2021). <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.703832>.
- Maddela, N.R., D. Kakarla, L.C. García, S. Chakraborty, K. Venkateswarlu, et M. Megharaj. « Cocoa-Laden Cadmium Threatens Human Health and Cacao Economy: A Critical View ». *Science of the Total Environment* 720 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>.

- Mezynska, M., et M.M. Brzóska. « Environmental Exposure to Cadmium—a Risk for Health of the General Population in Industrialized Countries and Preventive Strategies ». *Environmental Science and Pollution Research* 25, n° 4 (2018): 3211-32. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0827-z>.
- Mng'ong'o, M., L.K. Munishi, P.A. Ndakidemi, W. Blake, S. Comber, et T.H. Hutchinson. « Toxic Metals in East African Agro-Ecosystems: Key Risks for Sustainable Food Production ». *Journal of Environmental Management* 294 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112973>.
- Nag, R., S.M. O'Rourke, et E. Cummins. « Risk Factors and Assessment Strategies for the Evaluation of Human or Environmental Risk from Metal(Loid)s – A Focus on Ireland ». *Science of the Total Environment* 802 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149839>.
- Okereafor, U., M. Makhatha, L. Mekuto, N. Uche-Okereafor, T. Sebola, et V. Mavumengwana. « Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic Life and Human Health ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, n° 7 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>.
- Schaefer, Heather R., Sherri Dennis, et Suzanne Fitzpatrick. « Cadmium: Mitigation Strategies to Reduce Dietary Exposure. » *Journal of Food Science* 85, n° 2 (février 2020): 260-67. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14997>.
- Singh, Anuradha, Shraddha Chauhan, Sunita Varjani, Ashok Pandey, et Preeti Chaturvedi Bhargava. « Integrated Approaches to Mitigate Threats from Emerging Potentially Toxic Elements: A Way Forward for Sustainable Environmental Management. » *Environmental Research* 209 (juin 2022): 112844. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112844>.
- Wang, Lin, Xiangfen Cui, Hongguang Cheng, Fei Chen, Jiantong Wang, Xinyi Zhao, Chunye Lin, et Xiao Pu. « A Review of Soil Cadmium Contamination in China Including a Health Risk Assessment. » *Environmental Science and Pollution Research International* 22, n° 21 (novembre 2015): 16441-52. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5273-1>.
- Wimalawansa, S.A., et S.J. Wimalawansa. « Environmentally Induced, Occupational Diseases with Emphasis on Chronic Kidney Disease of Multifactorial Origin Affecting Tropical Countries ». *Annals of Occupational and Environmental Medicine* 28, n° 1 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40557-016-0119-y>.
- Zhao, D., P. Wang, et F.-J. Zhao. « Dietary Cadmium Exposure, Risks to Human Health and Mitigation Strategies ». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2099192>.
- Zhou, M., et Z. Li. « Recent Advances in Minimizing Cadmium Accumulation in Wheat ». *Toxics* 10, n° 4 (2022). <https://doi.org/10.3390/toxics10040187>.

Annexe 6 : Options d'action visant les zones, sites et sols pollués

La présente auto-saisine étant centrée sur l'exposition agrégée et la priorisation de leviers d'action à l'échelle de la population générale, **le GT se concentre dans ce rapport sur les options d'action visant les pollutions diffuses impactant la population générale**. Il tient néanmoins à souligner les enjeux d'une prévention des risques localisée pour des publics à risque accru fréquentant ou résidant à proximité de **zones, sites et sols pollués**, par exemple en lien avec la présence (actuelle ou passée) d'activités industrielles (ex. métallurgie, fabrication de batteries ou de matières plastiques) ou de traitement et de recyclage des déchets (ex. incinération des déchets ménagers, recyclage de déchets électriques et électroniques). Le GT rappelle, à ce titre, des leviers d'action en la matière.

- Restrictions visant les activités agricoles

Le GT a également identifié en France des **mesures localisées restreignant des activités agricoles, de pêche et d'aquaculture** de produits accumulant du cadmium. En effet, certaines zones sont plus contaminées en cadmium que d'autres, en raison du fond géochimique, d'activités minières en amont ou encore d'activités de traitement des métaux.

Par exemple, cela a donné lieu, sur le site historique de l'ancienne fonderie Métaleurop (1881-2003) de Noyelles-Godault, dans les Hauts-de-France, à des **restrictions sanitaires** d'utilisation et de mise sur le marché de productions agricoles végétales et d'origine animale issues des zones reconnues contaminées par des métaux lourds, dont le cadmium (arrêtés préfectoraux interdépartementaux du 29/5/15). Compte-tenu de la persistance du cadmium et du plomb dans les sols de la zone concernée, une expertise sur le sujet de l'Anses (2018) avait recommandé de « pérenniser un dispositif d'accompagnement visant à continuer d'orienter progressivement la production agricole du site vers des filières à vocation non alimentaire » (p.ex. production d'énergie et matériaux via la production de biomasses ou la méthanisation des cultures, production d'huiles essentielles végétales), tout en veillant à prévenir le risque de pollution diffuse secondaire dans d'autres secteurs d'activités.

Le GT souligne que les 5^{èmes} Rencontres nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués (ADEME, 2025) ont mis en évidence les possibles transferts de polluants même à longue distance (particules fines) à partir des sites et sols pollués (SSP) qui peuvent agir comme des sources de polluants surtout si le sol est nu. Le couvert végétal réduit l'exposition aux polluants en limitant le contact direct avec le sol, l'érosion, l'envol de poussière et les transferts de contaminants à partir du sol superficiel, tant horizontaux que verticaux. Couplé à des amendements organiques, biologiques ou minéraux, le végétal peut permettre de conserver le sol pollué en place (économie de ressources) voire d'améliorer certaines de ses fonctions tout en apportant des services écosystémiques au bénéfice des populations humaines (stockage de l'eau et du carbone, et réservoir de biodiversité en particulier). C'est pourquoi la loi zéro artificialisation nette (ZAN) vise la réduction de l'artificialisation des sols.

De plus, les efforts pour tracer les SSP doivent être maintenus afin d'éviter des lacunes de connaissances sur les usages historiques des espaces qui peuvent conduire à l'installation d'agriculteurs sur des SSP non répertoriés et/ou des exploitations agricoles anciennes qui utilisaient des pesticides très persistants interdits aujourd'hui (Bravin, 2024).

- *Restrictions visant les activités de pêche et d'aquaculture*

Par ailleurs, dans les secteurs aquacoles et de la pêche, pour que la mise sur le marché de coquillages soit permise en France, les **zones** sont **évaluées et classées** sur le plan réglementaire. Certaines zones ont ainsi historiquement été fermées en raison de la contamination en cadmium. C'est le cas de l'Estuaire de la Gironde, dont le réservoir sédimentaire a été pollué au cadmium en partie du fait des activités historiques d'un site métallurgique de zinc en Aveyron. En 1995, cette pollution a occasionné une interdiction de la récolte de coquillages dans l'Estuaire pour la consommation immédiate, le reparcage et la purification. Depuis, des actions ont été entreprises ou étudiées pour réduire la contamination et remise en suspension du cadmium (ex. arrêt de la production de zinc, excavation et confinement des déchets, retraitement des eaux souterraines, séquestration sédimentaire). Les flux de cadmium ont diminué et, en 2014, la récolte et la mise sur le marché des huîtres après passage en bassin de purification a de nouveau été autorisée dans les bassins du Nord Médoc (Blanc et al., 2015, Duval et al., 2024). Le dispositif de surveillance piloté par la DGAL mobilise plusieurs acteurs dont l'IFREMER, qui est impliqué dans la définition du statut sanitaire des zones de production des coquillages. Des enjeux spécifiques peuvent néanmoins se présenter. Par exemple, les huîtres et les moules sont élevées dans une zone délimitée, ce qui permet de vérifier le respect de la réglementation en amont de leur mise sur le marché. En revanche, les pectinidés (coquilles Saint-Jacques, pétoncles) sont pêchés au large : il n'y a pas d'analyse préalable de l'état sanitaire de la zone de pêche ni des coquillages à chaque retour de bateau, ce qui explique la survenue de non-conformités à l'occasion des plans de surveillance ou de contrôle, alors que ces produits sont déjà sur le marché.

- *Maîtrise du risque de pollution des milieux, remédiation, restauration*

Par ailleurs, le GT relève l'existence d'une diversité de **cadres ou démarches d'accompagnement à la maîtrise du risque de pollution des milieux** et aux **restrictions** qui y sont associées. Sans qu'il ne s'agisse ici d'en faire un inventaire exhaustif¹⁴¹, des outils ont été repérés, tels que le Guide méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (DGPR, 2017) et le Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués (DGPR, 2011). Concernant plus particulièrement le cadmium, des indications de mesures de gestion du risque en cas de dépassement de valeurs repères dans les sols pollués ont été formulées par le HCSP (2022). Plus globalement, la méthodologie nationale déployée dans le domaine des SSP prévoit de s'assurer qu'existe une compatibilité entre l'état des milieux et leurs usages (IEM) et, le cas échéant, de maîtriser les sources de polluants (Plan de gestion).

A l'échelle internationale, des publications scientifiques de synthèse mettent en avant diverses technologies de **remédiation** dans les sols et les eaux polluées (Genchi et al., 2020) ainsi que des techniques de détections associées (Irfan et al., 2021).

¹⁴¹ En France, une grande diversité de dispositions (réglementaires ou non) de gestion des sites et sols pollués s'inscrivent dans une politique de gestion des risques, incluant des modalités de suppression des pollutions ou de maîtrise de leurs impacts impliquant de nombreux acteurs publics et privés concernés (p.ex. surveillance de la qualité des sols et concertations en cas de changement d'usage / reconversion, étude des techniques disponibles de suppression ou maîtrise des risques, analyse des coûts économiques associés...) (Ministères de l'Aménagement du Territoire et de la Transition écologique, 2025).

Par ailleurs, de nouvelles utilisations des sols pollués peuvent être envisagées afin de restaurer voire d'améliorer leurs fonctions tout en réduisant l'exposition aux polluants. La réhabilitation écologique qui prend en compte la dégradation de l'écosystème, les futurs usages des terres, la faisabilité des solutions et l'impact du changement climatique, permet une gestion plus durable des SSP. La méthodologie nationale de gestion des SSP repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux. Les avancées réglementaires concernant la biodiversité et de climat couplées notamment avec la proposition d'une directive sur la surveillance et la résilience des sols et l'adoption d'un décret sur les usages en gestion des SSP dont l'**usage de renaturation** (Usage n°7, Article 1, Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022) sont de nature à inciter les acteurs des SSP à s'intéresser à des alternatives respectueuses de l'environnement, telles que les phytotechnologies.

La gestion des sites et sols pollués a récemment fait l'objet d'un rapport sénatorial sur « les problèmes sanitaires et écologiques liés aux pollutions des sols qui ont accueilli des activités industrielles ou minières, et sur les politiques publiques et industrielles de réhabilitation de ces sols » qui incluait diverses propositions : 1) améliorer la qualité et la lisibilité de l'information sur les sites et sols pollués ; 2) introduire dans la législation française un véritable droit de la protection des sols ; 3) améliorer la surveillance pour mieux prévenir et gérer les pollutions des sols ; 4) réunir les conditions d'une gestion réactive et transparente des risques sanitaires et d'une meilleure réparation des préjudices écologiques ; 5) mobiliser les friches industrielles et minières dans une démarche d'aménagement durable (Lafon et Jourda, 2020).

Sur ces enjeux, le GT indique que l'intégration volontaire des préoccupations sociales et environnementales aux activités des entreprises (enjeux de RSE) influent sur la mise en œuvre des actions. Par exemple, des travaux de modélisation de la concertation entre industries à risque et riverains apportent un éclairage sur l'influence que peut avoir la participation des riverains à la préparation des études de danger et sur les investissements de sécurité à mettre en œuvre qui en découlent (Piluso, 2017).

Annexe 7 : Le cas des jardins potagers

Les jardins potagers peuvent être sources d'alimentation de qualité et représenter une activité physique intéressante, mais, parfois, leurs sols et productions peuvent être dégradés. Or, **contrairement aux denrées commercialisées, dans le cas des jardins il n'y a pas de contrôles de l'Etat.**

Plus spécifiquement, à l'échelle de la France, il existe des milliers de sites et sols pollués (SSP). La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) impose des évaluations des transferts de polluants vers les milieux (air, sol, eaux) aux abords de ces sites. C'est pourquoi, l'Ademe et l'INERIS ont entamé dans les années 2000 une étude qui a débouché sur un guide d'échantillonnage des légumes dans les jardins proches d'ICPE et deux bases de données de concentrations en polluants dans les végétaux : BAPPET/polluants inorganiques et BAPPOP/polluants organiques.

Plusieurs dispositifs permettent de conserver la mémoire des sites pollués, potentiellement pollués ou réhabilités avec une pollution résiduelle :

- la carte des anciens sites industriels et activités de service (CASIAS) ;
- les secteurs d'information sur les sols (SIS) ;
- les restrictions d'usage : servitudes d'utilité publique (SUP), restrictions d'usage entre partie (RUP) ou projet d'intérêt général (PIG).

La CASIAS est une cartographie permettant d'identifier tous les endroits où une activité susceptible d'avoir pollué a été exercée, sans présager de la pollution réelle du site.

Les SIS, créés par la loi ALUR (loi 2014-366 du 24/03/2014) et modifiés par la loi industrie verte (loi 2023-973 du 23/10/2023) sont actés par arrêté préfectoral. Ils intègrent les sites sur lesquels une pollution des sols avérée justifie la réalisation d'études de sols et la prise en compte de cette pollution dans les projets de construction ou d'aménagement, ou en cas de changement d'usage. Les SIS sont mis à disposition du public sur le site Géorisques¹⁴². Ils sont également annexés aux documents d'urbanisme (plans locaux d'urbanisme, cartes communales). Par ailleurs, les SIS font l'objet d'une information écrite par le vendeur ou le bailleur du terrain à l'acquéreur ou au locataire (article L. 125-7 du code de l'environnement).

La restriction d'usage en matière de sols pollués est une limitation du droit de disposer de la propriété d'un terrain. Cette limitation attachée à une parcelle consiste en un ensemble de recommandations, de précautions, voire d'interdictions sur la manière d'utiliser, d'entretenir, de construire ou d'aménager, compte-tenu de la présence de substances polluantes dans les sols (Guide de mise en œuvre des restrictions d'usage applicables aux sites et sols pollués, Direction générale de la prévention des risques, 2011). Ces restrictions d'usage sont le plus souvent instaurées par le biais de servitudes d'utilité publique (SUP).

Les SIS et les SUP sont annexés aux documents d'urbanisme (plans locaux d'urbanisme, cartes communales) et sont diffusés sur le site Géorisques. Les SIS font aussi l'objet d'une information écrite par le vendeur ou le bailleur du terrain à l'acquéreur ou au locataire (article L. 125-7 du code de l'environnement). Les SUP sont conservées aux Hypothèques.

Par ailleurs, dans son document sur la définition des valeurs repères pour le cadmium dans les sols, le HSCP (2022) préconise un certain nombre de mesures de gestion à destination des opérateurs (ARS, DREAL) en cas de dépassement de valeurs repères dans les sols. Cela

¹⁴² <https://www.georisques.gouv.fr/risques/sites-et-sols-pollues/donnees#/>

inclut, pour les sols racinaires¹⁴³, un seuil de vigilance active de 1 mg Cd kg⁻¹ MS (abaissé à 0,5 mg Cd kg⁻¹ de MS dans le cas d'une autoconsommation à 100%). Par ailleurs, pour cette concentration en cadmium dans les sols racinaires, deux valeurs seuils dites « d'action rapide » ont été définies pour les enfants de moins de 7 ans (5 mg kg⁻¹ MS) et pour le reste de la population (10 mg kg⁻¹ MS). Le HCSP énonce des propositions de mesures de gestion en cas de dépassement de ces différents seuils (prélèvements et analyses sur les végétaux cultivés sur le site et – selon les résultats – mesures de gestion adaptées, préconisations aux occupants ou usagers des zones concernées pour réduire leur exposition, et, le cas échéant, recommandation de dépistage biométrieologique des surexpositions individuelles selon les modalités fixées par la HAS).

A la suite d'une étude spécifique sur une zone donnée et en cas de pollutions avérées, des recommandations et mesures d'hygiène peuvent ainsi être diffusées par l'ARS à la population locale, portant notamment sur les pratiques d'autoconsommation (Mombo et al., 2016 ; Badreddine et al., 2019).

De manière préventive, des guides ont été rédigés pour les collectivités et les aménageurs souhaitant créer des jardins collectifs, afin de les aider à définir les critères de sélection du site à aménager, en adapter les usages en fonction de la qualité des sols et mieux appréhender les risques sanitaires (Barbillon et al., 2020 ; ARS Ile de France, 2022).

Mais pour les particuliers, il semble exister peu de ressources et de recommandations à titre préventif, ou pour limiter le risque en cas de suspicions de contaminations. Il paraît donc souhaitable de renforcer l'information du public et en particulier des jardiniers amateurs, en faisant la publicité de ces sources d'information au niveau local. Ainsi, le projet de loi rédigé par le Sénat (n°594) en 2021 visait notamment à renforcer le développement d'une information claire, pédagogique et accessible, y compris en termes de risques sanitaires et d'accompagner la montée en puissance des SIS, en impliquant plus fortement les collectivités territoriales dans leur élaboration.

Ces recommandations pourraient venir **compléter le guide d'autoconsommation en toute sécurité de la DGS**. Elles pourraient faire l'objet de communication auprès des **préfectures, mairies et associations de jardiniers**.

¹⁴³ Définis par le HCSP comme les sols auxquels les racines des végétaux ont accès (généralement compris en 0 et 50 cm pour les végétaux dont le système racinaire est peu dense et peu profond comme les légumes)

Annexe 8 : implications de deux scénarios d'adaptation à une action réglementaire sur le cadmium dans les engrais minéraux phosphatés dans l'Union européenne : extraits de résultats de deux évaluations

Scénarios^a Etudes <u>Action étudiée</u> <u>Méthode</u>	(1) Implications d'un approvisionnement en roches / engrais phosphatés à moindre concentration en cadmium	(2) Implications de la décadmiation
Oosterhuis et al., 2000 <u>Taxe</u> (ex. 1€ / g de cadmium) ^b ▪ <i>Identification des principaux producteurs / utilisateurs de produits phosphatés</i> ▪ <i>Analyse de tendances en matière de production et de commerce</i> ▪ <i>Examen des options visant à réduire la concentration en cadmium</i> ▪ <i>Analyse par scénarios décrivant les réactions possibles de l'industrie des engrais</i>	▪ Scénario probable à moyen / long-terme, déjà adopté dans les pays de l'UE appliquant des limites plus basses en Cd ▪ Implique une substitution de l'approvisionnement en roches à concentrations élevées (ex. Afrique du Nord / Centrale) par des roches à concentrations plus basses (ex. Afrique du Sud, Russie) ▪ Réserves / gisements probablement suffisants dans les pays producteurs de roches à faible concentration en cadmium, mais celles-ci peuvent ne pas convenir pour produire tous types d'engrais ▪ Difficultés de compétitivité pour pays exportateurs de roches à concentration très élevée en cadmium (sauf si décadmiation possible) ▪ Réduction du cadmium dans le phosphogypse co-produit	▪ Scénario envisageable à long terme si les conditions du marché et technologiques sont réunies ▪ Procédés de décadmiation coûteux, développement en cours de technologies (accélération possible si obstacles dans scénario 1) ▪ En cas de seuil de réglementation / taxation strict, certaines matières premières à concentration en cadmium très élevées (ex. Sénégal, Togo) pourraient ne pas convenir à ce procédé ▪ Pas de réduction du cadmium dans le phosphogypse co-produit ▪ Cadmium issu de la décadmiation : déchet à anticiper à terme
Cupit et al., 2002 <u>Concentrations limites</u> (plusieurs seuils) ^c ▪ <i>Identification d'options actions</i> ▪ <i>Analyse qualitative selon 4 critères : efficacité, faisabilité, impact économique, évaluabilité</i> ▪ <i>Evaluation quantitative de l'impact d'une hausse de prix sur l'offre et la demande</i>	▪ Scénario privilégié à court terme, tendance préexistante ▪ Faible coût ▪ Incertitude sur disponibilité en roches à faible concentration en Cd ▪ Incertitude sur la faisabilité technique d'utiliser la roche ignée ▪ Réduction du cadmium dans le phosphogypse co-produit ▪ Déplacement de l'usage de fertilisants à concentration élevée en cadmium ailleurs dans le monde	▪ Scénario privilégié à moyen-long terme ▪ Investissements dans des technologies susceptibles d'être rentables à long terme ; base technologique probablement suffisante pour développer des installations industrielles ▪ Incertitude relative aux coûts, à l'efficacité, aux pertes de production. ▪ Production de déchets
	▪ Efficacité en termes de réduction des flux de cadmium dans les sols européens ▪ Faible impact des modalités de taxation envisagées sur les agriculteurs (hausse de coût < 1%)	
	▪ Efficacité : qualité homogène des engrais, stabilisation de la concentration en cadmium dans les sols, réduction des risques liés aux denrées ▪ Libre circulation des marchandises, faibles impacts économiques sur les agriculteurs (pires cas : + 3,9 à 13,3% de la dépense) ▪ Impacts économiques négatifs sur les exportateurs de roches phosphatées à concentration élevée en cadmium	

^a Oosterhuis et al. évoquent un scénario de base selon lequel les mesures (réglementation / taxe) n'auraient qu'un faible impact sur l'offre et la demande : ils le jugent peu probable dans la durée, les producteurs de roches phosphatées à forte concentration en cadmium se retrouvant probablement dans l'obligation de répercuter le montant de la taxe sur les prix pour préserver leurs marges.

^b Les auteurs exposent les implications de différents scénarios de taxation, non détaillées ici. Le recours à ce type d'instrument est évoqué dans la section 7.3.2.6

^c Les auteurs analysent d'autres options (taxe sur le cadmium, évolution des pratiques agricoles, identification de territoires à risques). Le recours à ces options est abordé par ailleurs dans le présent rapport (sections 7.3.2.6 et 7.3.3)



AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr