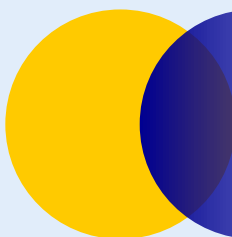




HAUT-COMMISSARIAT
À LA STRATÉGIE
ET AU PLAN

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RAPPORT
décembre 2025

Améliorer les évaluations socioéconomiques dans le secteur de l'énergie

Rapport d'étape

Conseil scientifique
des méthodes d'évaluation
socioéconomique



AMÉLIORER LES ÉVALUATIONS SOCIOÉCONOMIQUES DANS LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE

Rapport d'étape
du groupe de travail
« Énergie et Innovation »

Luc Baumstark et Jean-Paul Bouttes
coordinateurs

Conseil scientifique
des méthodes d'évaluation socioéconomique



**HAUT-COMMISSARIAT
À LA STRATÉGIE
ET AU PLAN**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

DÉCEMBRE 2025



SOMMAIRE

Synthèse.....	5
Introduction.....	11
Chapitre 1 – L'évaluation des projets.....	13
1. Un exemple au stade du déploiement industriel : une usine de production d'hydrogène vert par électrolyse.....	13
1.1. Sur les parties 1 et 2 de l'ESE : quels besoins et quels enjeux pour le pays ? quels verrous scientifiques, techniques et industriels ?.....	14
1.2. Sur les parties 3 et 4 de l'ESE : l'analyse coûts-bénéfices de l'acteur privé et l'analyse coûts-bénéfices pour l'intérêt général.....	18
2. Les autres projets au stade du déploiement potentiel : batteries et décarbonation de l'acier.....	20
2.1. Batteries.....	21
2.2. Décarbonation de l'industrie : l'exemple de l'acier.....	24
3. La préparation de l'avenir sur des technologies non matures : l'exemple des petits réacteurs nucléaires.....	25
3.1. Les projets de SMR-AMR de France 2030.....	25
3.2. Pour un ciblage plus précis des projets sur les principaux besoins.....	26
Chapitre 2 – Feuilles de route stratégiques, finalités et processus d'évaluation : l'amont des projets.....	31
1. Feuilles de route stratégiques et politiques publiques.....	32
1.1. L'importance des feuilles de route stratégiques.....	32
1.2. Trois axes de progrès.....	32

1.3. La cohérence et la crédibilité des politiques publiques constituent un volet important pour les projets.....	34
2. Les finalités : décarbonation, souveraineté et compétitivité de long terme	34
2.1. La valeur tutélaire du carbone ou valeur de l'action climat et son utilisation dans les ESE.....	34
2.2. Les autres finalités	37
3. Processus d'appel à projet et d'évaluation, gouvernance, organisation et compétences mobilisées	39
3.1. Un contexte fortement évolutif	39
3.2. S'inspirer des meilleures pratiques	39
3.3. Renforcement des instances en charge des feuilles de route stratégiques.....	40
3.4. Mobiliser davantage de scientifiques, industriels et économistes ayant piloté des projets stratégiques	40

Chapitre 3 – Messages clés et propositions pour la deuxième étape.....41

1. Questions et recommandations	41
1.1. L'évaluation socioéconomique	42
1.2. ESE et feuilles de route stratégiques des pouvoirs publics.....	43
1.3. Besoin de clarification et d'approfondissement des différentes finalités d'intérêt général	44
1.4. Mise en place d'un processus d'apprentissage collectif	44
2. Propositions pour la deuxième étape	44
2.1. Cahier des charges du groupe de travail	44
2.2. Méthodes de travail	45

Annexes

Annexe 1 – Composition du groupe de travail et personnes auditionnées.....	49
Annexe 2 – Documents et références mobilisés dans les séances de travail.....	51



SYNTHÈSE

Le Conseil scientifique des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements de l'État du Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan (HCSP) a souhaité établir un diagnostic des pratiques qui régissent aujourd'hui les démarches évaluatives engagées en amont des projets d'investissement dans le secteur énergétique. Ce secteur traverse une période de transition majeure, avec des incertitudes nombreuses de nature économique ou géopolitique à moyen et long terme, notamment sur l'offre d'énergie et sur la demande – incertitudes qui pèsent sur la viabilité économique et industrielle d'innovations technologiques plus ou moins matures. Les acteurs du secteur – qu'ils soient privés ou publics – sont confrontés à des équilibres internationaux fortement perturbés, face à un marché mondialisé en forte compétition et à des perspectives de financement très dégradées.

De nombreux projets de décarbonation innovants dans le secteur de l'énergie et soutenus par les pouvoirs publics en France sont aujourd'hui en difficulté. C'est notamment le cas de la filière hydrogène et du secteur de l'acier, avec des risques significatifs de délocalisation.

Ce rapport d'étape vise à fournir un premier diagnostic des faiblesses qui fragilisent les évaluations socioéconomiques (ESE) dans le secteur de l'énergie, à partir d'exemples dans quatre domaines représentatifs du secteur – l'hydrogène, les batteries, l'acier et le nucléaire –, pour dessiner des voies de progrès tenant compte des retours d'expérience. Il vise également à donner des éléments de cadrage pour une seconde étape qui devrait déboucher sur un guide méthodologique revisité pour l'évaluation des projets et sur un certain nombre de recommandations.

L'importance de l'évaluation socioéconomique dans le choix des investissements dans le secteur de l'énergie

Dans un contexte perturbé, l'intérêt des procédures d'évaluation en amont des projets se trouve décuplé. Ces approches ont en effet pour ambition de proposer à la puissance publique et plus généralement au débat public, nécessairement traversé par des controverses

sur ces sujets, un cadre mettant en balance, de la manière la plus robuste possible, d'une part l'ensemble des avantages attendus des projets dans leurs différentes dimensions, d'autre part les coûts et plus largement les ressources à engager pour les obtenir, sachant que bien des paramètres et des attendus sont soumis à des aléas importants. Ces outils doivent pouvoir s'appuyer sur un cadre cohérent qui ne varie pas en fonction des projets et des argumentaires des porteurs de projets. L'un des objectifs de ces programmes et de ces projets est d'impulser ou d'accélérer un développement industriel dans des secteurs clés du domaine. D'où l'importance d'avoir une vision à long terme réaliste et un *timing* des investissements bien adapté à l'objectif.

Le secteur de l'énergie a été par le passé l'un des secteurs d'activité où cette démarche et ces outils ont pu être développés de manière systématique, et où ils ont permis de fonder une stratégie de long terme dont la collectivité profite aujourd'hui. Ce cadre, sans disparaître, s'est fortement affaibli. Ces outils sont indispensables pour fonder une vision de long terme qui relève de la responsabilité de l'État.

Les faiblesses des évaluations socioéconomiques actuelles

L'analyse des ESE et des contre-expertises exigées depuis la loi de finances de 2012 puis menées récemment sur les différents projets envisagés dans ce secteur et dans le cadre du plan France 2030 permet de dresser un bilan de ce qui a pu être engagé et des difficultés qui n'ont pas été totalement surmontées.

Cette analyse engagée avec l'aide d'un comité regroupant des personnalités reconnues du monde scientifique et industriel a mis en évidence un certain nombre de faiblesses majeures. Il apparaît nécessaire de les corriger si l'on souhaite profiter de l'aide apportée par ces approches pour renforcer les stratégies que l'État se doit de mettre en place dans le secteur énergétique.

Il convient de distinguer *quatre types de faiblesses* car les réponses à apporter ne seront pas de même nature. Il y a d'abord celles qui concernent le contenu des ESE et la manière de décrire les enjeux industriels, économiques et scientifiques que soulèvent les projets. S'y ajoutent des faiblesses méthodologiques qui concernent la manière d'intégrer dans l'évaluation l'ensemble des enjeux socioéconomiques pour la collectivité. Il y a également une faiblesse structurelle qui s'explique par la difficulté à articuler ces ESE avec un cadre stratégique robuste traduisant l'ensemble de la stratégie de l'État dans le secteur. Enfin, les ESE ont du mal sur l'ensemble de ces points à produire une analyse de risque suffisamment étayée.

Les caractéristiques spécifiques à prendre en compte dans les évaluations des projets

Les ESE envisagées dans ce rapport sont confrontées à des spécificités qu'il convient de rappeler et qui rendent l'exercice particulièrement délicat.

Les investissements considérés sont des investissements à long terme sur plusieurs décennies et ce sont des projets innovants mobilisant des technologies d'avenir qui, par définition, relèvent d'innovations technologiques encore en gestation.

Ce sont des projets impliquant des acteurs publics et privés, confrontés à des marchés incertains, à des politiques publiques évolutives qui ne sont pas toujours soutenables, et pour certains d'entre eux à une forte concurrence internationale. Ce sont donc des projets risqués dont l'existence est exposée à de nombreux aléas.

Par ailleurs, ces projets répondent à plusieurs objectifs importants des pouvoirs publics – de la décarbonation à la réindustrialisation en passant par l'aménagement du territoire et la défense de la souveraineté –, le rôle de l'État étant de permettre l'adaptation du secteur industriel à ces objectifs de long terme nécessaires au pays.

Les principales caractéristiques des projets examinés dans le cadre de ce travail sont, de ce point de vue, représentatives de celles de l'ensemble des investissements dans le secteur de l'énergie.

Deux enjeux principaux – critiques pour le bilan des ESE – doivent être particulièrement soulignés.

Discuter précisément la viabilité technique, industrielle et économique du projet évalué

Un premier enjeu concerne l'examen méticuleux de la viabilité technique, industrielle et économique du projet évalué (en tenant compte du soutien public à l'investissement). Cet examen exige une attention accrue aux verrous scientifiques, industriels et économiques. On pense notamment à l'intérêt d'examiner les TRL (*Technology Readiness Levels*), les maturités techniques et économiques, et le passage de la ligne pilote à l'échelle industrielle. Cet examen exige également de prendre en compte la compétitivité dans un contexte de concurrence internationale et de développer une analyse des risques associés aux marchés comme aux politiques publiques pendant la vie du projet. Ces différents volets sont parties intégrantes de l'ESE et doivent être davantage explicités et discutés avec les pouvoirs publics. Ces derniers doivent pouvoir mobiliser pour cela des compétences scientifiques industrielles et économiques de pilotage opérationnel. Ces volets doivent contribuer à l'élaboration de business

plans présentant des études de sensibilité aux différentes hypothèses et des variantes prenant en compte l'analyse des risques à tous les niveaux.

Le porteur de projet et les évaluateurs doivent pouvoir prendre l'initiative de questionner les hypothèses et le cadrage des feuilles de route stratégiques des pouvoirs publics si celles-ci paraissent trop éloignées de la réalité. Les compétences scientifiques, industrielles et économiques mobilisées par l'évaluateur doivent être capables de remettre en question les analyses du porteur de projet et d'évaluer la crédibilité de l'équipe porteuse du projet.

Prendre en compte l'intérêt général dans toutes ses dimensions notamment environnementales, économiques et sociales

Un deuxième enjeu concerne le traitement de l'intérêt général dans l'ESE. Il s'agit ici de préciser la manière dont peuvent être pris en compte, dans le bilan de l'évaluation, l'ensemble des objectifs publics auxquels le projet peut contribuer et qui justifient l'aide publique au financement. Ce qui suppose parfois d'aller au-delà du seul calcul d'une valeur actualisée nette socioéconomique (VAN-SE).

Tout d'abord, ces projets « bas carbone » ou de décarbonation partielle s'inscrivent dans la stratégie climatique de la France. Ce qu'ils apportent à cet objectif majeur du pays peut donc être valorisé en utilisant des valeurs tutélaires du carbone (VAC, valeur d'action du carbone) mais cela suppose aussi de choisir avec discernement les solutions contrefactuelles (scénario de référence). Le choix du scénario de référence est donc clé : il doit être construit sur la base des solutions alternatives les plus probables, compte tenu des progrès techniques et du contexte international. Si l'on se contente de retenir les solutions carbonées existantes, on risque de trouver une VAN-SE très importante (en raison des niveaux élevés de la VAC qui sont liés à l'objectif « émission nette zéro en France en 2050 ») justifiant potentiellement des aides très importantes alors qu'il existe souvent des alternatives sérieuses bas carbone à cet horizon.

Ensuite, d'autres objectifs publics stratégiques, que l'ESE doit prendre en compte, motivent le soutien des projets : la compétitivité à long terme et la capacité d'innovation du pays, la réindustrialisation et la souveraineté, l'aménagement du territoire et la question sensible des emplois. Ces dimensions devraient faire l'objet d'analyses beaucoup plus développées dans les ESE lorsqu'elles constituent une dimension fondamentale du projet pour éclairer la décision publique.

Ajoutons que l'absence fréquente de congruence entre décarbonation, compétitivité de long terme du pays et réindustrialisation-souveraineté pose une question de fond qui ne concerne pas seulement le secteur de l'énergie. Des tensions peuvent aussi exister avec d'autres dimensions environnementales (biodiversité, eau, etc.). Il y a là une problématique générale

qui doit être appréhendée précisément pour concevoir des grilles d'analyse qui articulent ces différentes dimensions et qui soient utiles à la décision publique.

L'importance des feuilles de route stratégiques ou *Strategic Roadmaps* en amont des projets

Les feuilles de route stratégiques des filières énergétiques et industrielles constituent des éléments essentiels sans lesquels il est difficile de bâtir des ESE robustes et utiles à la décision :

- d'abord parce qu'elles sont à l'origine des appels à projet et donc des principales caractéristiques de ces projets ;
- ensuite parce qu'elles fournissent (ou devraient fournir) un cadrage des hypothèses clés pour les business plans concernant le contexte économique et industriel du projet ;
- enfin parce que ces projets n'ont de sens qu'au sein des systèmes industriels et énergétiques dont ils sont un simple maillon. Leur condition de réussite dépend donc de la mise en place cohérente de ces systèmes ou filières dans toutes leurs dimensions.

Pour assurer leur rôle sur ces trois registres, et notamment pour permettre aux porteurs de projets de bien instruire leur dossier, ces feuilles de route stratégiques devraient être plus précises et davantage en prise avec l'actualité internationale pertinente. Les documents auxquels le groupe a pu avoir accès étaient insuffisants à cet égard.

Ces documents de cadrage devraient faire l'objet, à leur niveau (programme concernant une filière industrielle ou énergétique), d'une évaluation socioéconomique avec une attention forte pour l'ensemble des points évoqués ci-dessus pour les ESE de projets. Ils devraient donc prendre en compte les verrous techniques, économiques et industriels, s'assurer de la soutenabilité économique dans la durée des programmes industriels associés et comporter une analyse de risque.

Par ailleurs, l'articulation entre la stratégie de décarbonation de l'économie française et les feuilles de route technologiques, industrielles et énergétiques mériterait une réflexion qui prenne en compte les évolutions du contexte international et les difficultés rencontrées récemment dans la conduite de ces programmes et projets.

Le rôle central dans la plupart des projets des prix à long terme de l'électricité, de la structure du mix de production-réseau ainsi que de l'évolution de la demande milite pour un examen spécifique de cette question.

Pilotage et coordination renforcés du processus des évaluations des projets et des programmes

Les modes de fonctionnement de l'État devraient pouvoir mieux s'adapter à un contexte général difficile et mouvant.

La nature évolutive des projets – liée au contexte international et aux innovations – comme celle des feuilles de route stratégiques des filières militent pour une gouvernance adaptée, avec un suivi des projets (qui existe déjà) et surtout la mise en place structurée d'une boucle rapide de retour des projets en cours (difficultés rencontrées et acquisition d'informations) vers ces feuilles de route, afin de les faire évoluer et de rester en prise avec la réalité.

Cependant, le nombre des entités mobilisées, notamment sur les feuilles de route stratégiques, interroge le pilotage d'ensemble de ces projets et programmes ainsi que la cohérence des politiques publiques associées qui sont également clés pour l'évaluation socioéconomique. Cette coordination a été dans le passé un des rôles du Plan.

Il pourrait être enfin utile de solliciter dans le cadre de cette gouvernance plus réactive et cohérente des compétences de haut niveau (scientifiques, industrielles et économiques) du type de celles que le groupe de travail a mobilisées dans sa première phase.

Ces feuilles de route stratégiques, comme les politiques publiques associées, devraient intégrer les dimensions européennes, contribuer à une stratégie européenne plus soutenable et améliorer sa gouvernance.



INTRODUCTION

Le Conseil scientifique des méthodes d'évaluation socioéconomique du Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan, a pour mission, notamment, d'améliorer les approches méthodologiques mobilisées dans les évaluations et la qualité des évaluations. Il a institué un groupe de travail pour appréhender les enjeux et les spécificités des évaluations dans le secteur de l'énergie et en particulier pour appréhender de manière pertinente les évaluations socioéconomiques des innovations majeures dans ce secteur. Il s'agit ici, en partant de l'analyse des évaluations socioéconomiques qui ont pu être engagées sur les projets énergie-climat innovants du programme France 2030, de proposer des améliorations méthodologiques pour apprécier la pertinence de l'ensemble des investissements et des financements réalisés par les pouvoirs publics dans ce secteur.

Compte tenu de l'importance de l'enjeu pour le pays – assurer une énergie bas carbone à coûts maîtrisés et contribuer à la réindustrialisation et la souveraineté du pays –, il a paru nécessaire d'examiner et de tester en amont la future méthode de travail, afin de tenir compte de trois caractéristiques essentielles de ces projets d'investissement :

- la **dimension de l'innovation**, avec des TRL¹ ou niveaux de maturité technologique très variés entre projets et, au sein même d'un projet, entre les différents sous-systèmes qui le composent. Cet aspect doit mener à une discussion précise sur les verrous scientifiques, techniques et industriels associés, ainsi que sur la faisabilité industrielle ;
- la **dimension du système industriel** (réacteur nucléaire avec le cycle combustible associé ou, pour les batteries, filière industrielle intégrée, des matériaux critiques au véhicule électrique) et du **système énergétique/électrique** (cohérence du mix de production-transport-distribution-usages), qui appelle une discussion précise sur l'insertion des projets

¹ L'échelle *Technology Readiness Level* (TRL) est utilisée pour évaluer le niveau de maturité technologique d'une innovation ou d'une technologie avant sa mise en œuvre opérationnelle.

au sein des filières industrielles et des mix énergétiques ainsi que sur la rentabilité économique des projets ;

- enfin, **la dimension de l'intérêt général**, qui demande d'élaborer et d'évaluer ces projets à la lumière des différents objectifs d'intérêt général poursuivis (décarbonation, souveraineté, compétitivité, etc.), en fonction d'hypothèses réalistes.

Pour ce faire, a été mise en place une première phase de travaux de quelques mois autour d'un groupe restreint, sollicitant des compétences de pilotage de projets scientifiques et industriels dans le domaine de l'énergie, présentes à l'Académie des sciences et à l'Académie des technologies, de manière à préciser un cadre de travail susceptible d'être pris en charge, dans une seconde phase, par un groupe élargi.

Pour cette phase pilote, quatre réunions ont été organisées sur les projets en cours dans les domaines suivants : hydrogène, batteries, décarbonation de l'industrie et petits réacteurs nucléaires. Les réunions ont permis d'analyser les bilans coûts-bénéfices¹ de certains projets spécifiques, ainsi que les feuilles de route et les cadrages stratégiques élaborés par les pouvoirs publics et à la disposition des porteurs de projet. Le but était de dégager de premières pistes de progrès et de proposer des évolutions concernant notamment le guide méthodologique à destination des évaluateurs publics.

Le rapport d'étape correspondant à cette phase des travaux a vocation à partager les résultats de ces premières analyses concernant la méthode d'évaluation des projets (Chapitre 1), les cadrages stratégiques et les feuilles de route (Chapitre 2, sections 1 et 2) et les compétences requises pour l'évaluation et l'organisation du processus menant au choix des projets ainsi que des moyens mis en œuvre pour leur suivi (Chapitre 2, section 3). Sur cette base sont formulées plusieurs recommandations et quelques propositions pour la deuxième étape du groupe de travail Énergie et Innovation (Chapitre 3).

Précisons que l'ambition du groupe de travail n'était pas de faire la contre-expertise de ces dossiers et encore moins de se prononcer sur les projets, mais bien de s'interroger, compte tenu des enjeux et des éléments présentés, sur ce qu'il eût été souhaitable de trouver dans ces dossiers pour qu'un lecteur se fasse une idée précise sur la robustesse des conclusions apportées. L'analyse systématique engagée – qui a dû être adaptée en fonction des travaux disponibles – permet de dresser la liste des points qui présentent le plus de fragilité et qui devront faire l'objet par la suite d'une investigation poussée pour formuler des recommandations opérationnelles.

¹ On retient ici le terme technique d'« analyse coûts-bénéfices » car il renvoie clairement à la terminologie anglo-saxonne de *Cost Benefit Analysis*, même s'il serait plus correct d'utiliser en français le terme d'« analyse coûts-avantages », le bénéfice étant déjà le solde des coûts et des avantages.



CHAPITRE 1

L'ÉVALUATION DES PROJETS

Quatre types de technologies ont été étudiées dans cette première phase. Tout d'abord, le secteur de l'hydrogène, qui faisait partie des dossiers les plus avancés en termes d'évaluation socioéconomique (ESE), avec notamment un exemple d'usine de production d'hydrogène vert par électrolyse (section 1), puis les secteurs des batteries et de la décarbonation de l'acier (section 2). L'analyse s'est construite sur des ESE qui ont pu être menées sur ce type d'investissement, en s'appuyant sur l'expertise de ces dossiers par le SGPI (Secrétariat général pour l'investissement) et sur les documents disponibles détaillant les programmes du plan France 2030. Enfin, des projets plus éloignés de la maturité technologique ont été étudiés, notamment à travers l'exemple des SMR et AMR ou *Small Modular Reactors* et *Advanced Modular Reactors* (section 3).

1. Un exemple au stade du déploiement industriel : une usine de production d'hydrogène vert par électrolyse

Les ESE étudiées au cours de nos trois premières réunions suivaient toutes le même plan en cinq parties : 1. Contexte et analyse stratégique ; 2. Description du projet ; 3. Business plan et VAN financière ; 4. VAN ESE et 5. Cartographie des risques.

Ces ESE portaient sur des projets de taille importante qui visaient une production à l'échelle industrielle d'hydrogène vert, de batteries pour véhicules électriques et d'acier bas carbone afin d'obtenir rapidement – dès 2030 – un impact sur les émissions de CO₂ du pays. L'analyse critique d'un exemple d'évaluation concernant une usine de production d'hydrogène vert par électrolyse permet d'illustrer les remarques qui peuvent être adressées à l'ensemble des évaluations étudiées.

1.1. Sur les parties 1 et 2 de l'ESE : quels besoins et quels enjeux pour le pays ? quels verrous scientifiques, techniques et industriels ?

De nombreux éléments techniques intéressants sont développés dans l'ESE, mais ils sont présentés de façon éparse, ce qui ne permet pas à l'évaluateur d'avoir une vision synthétique des enjeux du projet dès l'entrée dans le dossier. Ce n'est pas seulement un problème de présentation, dans la mesure où il ne s'agit pas simplement de décrire le projet, mais bien un problème de méthode, puisque ces caractéristiques du projet doivent être reprises dans l'analyse du bilan.

Il est en effet nécessaire de faire apparaître clairement dans l'évaluation les caractéristiques principales du projet qui sont déterminantes pour l'État, afin de dégager les raisons qui incitent à le soutenir. En l'occurrence, le projet vise ici à produire de l'hydrogène bas carbone à partir d'électricité renouvelable (intermittente), à destination surtout de l'industrie des engrais, mais aussi du marché de la mobilité, en achetant des électrolyseurs PEM¹ à un fabricant étranger, avec un projet de taille importante (100 MWe) comparé à ce qui se fait aujourd'hui, pour une production « de masse » dès la fin des années 2020.

Chacun de ces points – qui se déclinent selon les spécificités de chaque projet – mériterait d'être étudié à la lumière des besoins stratégiques de la France et des avantages comparatifs du projet.

Dans l'ESE présentée, ces points sont bien évoqués, mais de façon dispersée, de sorte qu'ils ne constituent pas une trame systématique structurant l'analyse d'ensemble. Leur présentation synthétique doit permettre d'aborder clairement les trois volets sur lesquels nous allons revenir :

- la *viabilité du projet* dans la durée, dans un contexte de concurrence internationale forte, avec un examen précis des marchés visés et des verrous technologiques ;
- la *pertinence du projet* par rapport aux alternatives technologiques ;
- enfin la *compatibilité du projet* avec les stratégies et les plans nationaux, dont la traduction se limite souvent à des éléments de langage repris de publications officielles.

Les motivations et la mise en perspective de ces choix techniques, économiques et stratégiques devraient être mises en exergue comme le font de manière systématique les documents présentés au comité d'engagement d'un grand groupe industriel.

Dans cet esprit, il serait important de faire apparaître d'emblée à ce niveau une analyse des risques clarifiant les conditions de réussite technologiques et économiques des projets –

¹ Proton Exchange Membrane = membrane à échange de protons.

analyse qui devrait ensuite se retrouver dans le business plan à la base de la VAN financière (et non dans la partie 5 de l'ESE dédiée à la cartographie des risques).

Quels sont les enjeux et les « justes besoins » pour la France ?

À la lecture de l'ESE présentée, on mesure la difficulté de mettre en balance les attendus du projet et son insertion dans une stratégie plus globale du pays.

Tout d'abord, concernant les marchés visés, le projet étudié entend produire de l'hydrogène vert par électrolyse, alimenté par des énergies renouvelables intermittentes, et destiné d'abord à l'industrie (des engrais notamment) en décarbonant les usages actuels de l'hydrogène gris (produit à partir des énergies fossiles, sans capture du carbone), ensuite aux transports. Ces choix soulèvent plusieurs questions qui mériteraient d'être développées dans l'ESE. Si l'on reprend le cadre d'analyse tridimensionnel retenu dans l'introduction – innovation, système industriel et intérêt général –, on peut interroger ces enjeux :

- **du point de vue du positionnement sur les marchés** : le projet visé entend d'abord décarboner des usages aujourd'hui satisfaits par l'hydrogène gris, notamment le marché des engrais, soumis à une forte concurrence internationale. Il entend ensuite s'adresser au marché de la mobilité, a priori moins assuré, compte tenu des interrogations sur les performances et la maturité de la chaîne logistique de l'hydrogène par rapport à la chaîne électrique dans les deux prochaines décennies, comme sur le coût associé au développement de deux infrastructures en parallèle, l'une électrique, l'autre hydrogène. La mise en place de cette chaîne logistique étant loin d'être assurée, un plan B devrait être proposé. De façon plus générale, les marchés de l'hydrogène vert sont sans doute plus fragiles et moins matures à court-moyen terme que ce que l'on imaginait, requérant une attention plus soutenue sur la cohérence des politiques publiques associées à la feuille de route du pays, en particulier relativement aux subventions (notamment européennes) pour la production à partir d'énergie renouvelable (RFNBO – carburant renouvelable d'origine non biologique). Ces subventions constituent probablement l'une des motivations d'un choix d'alimentation électrique uniquement renouvelable (et non bas carbone, ce qui serait sans doute plus cohérent avec la stratégie française).
- **du point de vue du système dans lequel le projet s'insère** : une analyse de l'alimentation en électricité serait utile. Un recours à de l'électricité bas carbone – en s'appuyant sur le mix nucléaire-hydraulique et autres énergies renouvelables de la France) et non sur les seules ENRi (énergies renouvelables intermittentes) – permettrait d'éviter une modulation trop fréquente de la production d'hydrogène, qui pourrait ne s'effacer que lors des périodes avec les prix de l'électricité les plus élevés et non en fonction de la production des ENRi. Cela permettrait en effet une utilisation plus longue des équipements

capitalistiques que sont les électrolyseurs, et éviterait de devoir lever les verrous technologiques associés au fonctionnement intermittent.

- **enfin, du point de vue de la souveraineté et de la réindustrialisation** : les électrolyseurs PEM choisis par le porteur de projet sont achetés à l'étranger, si bien que le projet ne contribue a priori pas à la montée en compétence en France sur leur fabrication et celle des composants associés. Les savoir-faire développés seront donc exclusivement liés à certains aspects connexes aux électrolyseurs : le *balance of plant* (les systèmes de pilotage de l'ensemble et les bâtiments auxiliaires) pour une usine d'électrolyseurs de grande taille, les bâtiments auxiliaires pour traiter et purifier l'hydrogène, le contrôle-commande et les ouvrages de stockage pour gérer les flexibilités liées à l'alimentation intermittente et l'arrimage aux besoins d'un flux en continu pour la fabrication d'engrais et aux besoins fluctuants de l'usage transport.

On mesure au final que pour mettre en évidence ces différents aspects dans l'évaluation, il est nécessaire de fournir des éléments supplémentaires concernant notamment la crédibilité de l'équipe pour mener à bien le projet, la crédibilité des fournisseurs retenus (notamment ici les entreprises américaines produisant des électrolyseurs PEM, une technologie moins mature que l'alcalin) et la crédibilité des politiques publiques d'aides nécessaires à la viabilité du projet, au-delà de la subvention à l'investissement dans ces marchés nouveaux et difficiles.

Faisabilité et verrous scientifiques, technologiques et industriels, et choix de la technologie selon les marchés visés et l'horizon de déploiement

Les discussions au sein du groupe de travail en réaction à la présentation de cette évaluation socioéconomique ont fait apparaître que le dossier gagnerait grandement en pertinence s'il fournissait des éléments précis concernant :

- **La faisabilité technique et le passage au stade industriel des technologies retenues.** En particulier, des questions demeurent sur le fonctionnement des électrolyseurs avec des effacements fréquents et importants. La capacité des électrolyseurs PEM à supporter ces variations, les impacts sur les auxiliaires de traitement chimique et de purification de l'hydrogène, les problèmes de sécurité associés liés aux risques d'incendie et d'explosion, la conception du contrôle-commande et de l'ensemble industriel avec une taille de l'usine élevée au regard de l'existant : pour chacun de ces verrous, il serait nécessaire d'explicitier les TRL associés et les plans d'action (donc les coûts) envisagés pour les lever.
- **Les verrous d'ordre économique,** pour lesquels il faudrait également disposer d'éléments plus précis sur les coûts d'exploitation et d'investissement :

- sur les coûts d'investissement, il serait nécessaire de distinguer clairement les coûts des électrolyseurs *stricto sensu* de ceux des bâtiments auxiliaires et du *balance of plant*, ainsi que les coûts associés notamment au stockage de l'hydrogène ;
- sur les coûts d'exploitation, essentiellement dus à ceux de l'électricité, il serait utile d'explicitier et d'interroger la robustesse des hypothèses sous-jacentes (anticipations des prix de marché, coûts complets des renouvelables, y compris réseau et stockages associés, etc.).
- **Le choix du scénario contrefactuel.** Celui-ci est crucial car il déterminera la viabilité du projet. Il n'y a pas de raison *a priori* que ce scénario contrefactuel soit mécaniquement l'hydrogène gris avec un prix et/ou une valeur du CO₂ élevée, car des recours à des technologies ou des intrants moins onéreux pourraient être envisagés. C'est en tout cas ce que devrait permettre de pointer une analyse plus précise des alternatives techniques et économiques :
 - choix différents d'alimentation électrique et conséquences sur la conception de l'usine (électricité bas carbone et non exclusivement ENRi) ;
 - recours à d'autres fournisseurs pour les électrolyseurs PEM. Les éléments techniques devraient également permettre de comprendre comment se positionnent les entreprises chinoises, acteurs essentiels du secteur ;
 - envisager d'autres types d'électrolyseurs, notamment alcalin (technologie la plus mature mais peu flexible), AEM¹, haute température (plus éloignée de la maturité, mais sur laquelle une entreprise française travaille) ;
 - examiner le scénario contrefactuel hydrogène par vaporeformage du méthane avec capture et stockage du CO₂.
- **Les projets analogues en cours de développement.** Le projet devra ensuite s'insérer dans un marché *a priori* concurrentiel. Évaluer la concurrence à l'horizon 2030-2040 permettrait ainsi d'évaluer la crédibilité des engagements des acheteurs industriels, eux aussi présents à l'international. Sur le marché des engrais par exemple, un certain nombre de projets existent dans des pays proches, notamment en Afrique du Nord, avec potentiellement des avantages significatifs en termes de coûts des ENRi, couplés à des coûts de transport faibles. Une vision complète de ces projets, en vue d'adapter les politiques publiques, serait bienvenue.

L'analyse critique de cette ESE particulière permet de mesurer les éléments essentiels qui risquent, s'ils ne sont pas suffisamment discutés et argumentés dans l'ESE, de peser sur la

¹ AEM = Anions Exchange Membrane = membrane à échange d'anions.

pertinence du bilan proposé. Ces différents points importants de la discussion montrent que le bilan d'un même projet peut fortement varier selon les hypothèses retenues par l'évaluateur. Cela invite, du point de vue méthodologique, à introduire ces hypothèses de manière systématique dans les ESE, afin qu'elles soient prises en compte directement dans l'analyse, en montrant précisément l'impact potentiel sur le bilan final. Par ailleurs, il serait indispensable de disposer dans l'ESE d'une évaluation technique qui devrait inclure non seulement le point de vue du développeur, mais également une contre-expertise de l'administration publique.

1.2. Sur les parties 3 et 4 de l'ESE : l'analyse coûts-bénéfices de l'acteur privé et l'analyse coûts-bénéfices pour l'intérêt général

La présentation d'ensemble du projet, avec ses éléments techniques et économiques détaillés, comme précisé plus haut, doit ouvrir sur une analyse coûts-bénéfices précise pour l'entreprise (le calcul de sa **VAN financière**), qui doit être ensuite comparée à la même analyse au regard de l'intérêt général (la **VAN socioéconomique**). Si la première est négative et la seconde positive, l'intervention publique semble a priori justifiée : la subvention à l'investissement peut être dimensionnée pour rendre la VAN financière nulle (à la base du calcul du déficit de financement – *funding gap*). L'ensemble des hypothèses et des données sous-jacentes sont donc pleinement nécessaires afin de juger de la viabilité du projet pour celui qui le porte (avec l'aide à l'investissement) et de sa valeur pour l'intérêt général. L'ESE doit permettre à l'acteur privé et à l'acteur public de s'accorder sur une vision d'ensemble partagée des principaux paramètres du calcul.

La VAN financière

Le calcul de cette VAN financière (ou VAN-FI) devrait permettre de donner les éléments de chiffrage et les raisonnements analogues à ceux fournis lors d'un comité d'engagement :

- **D'abord en mettant en évidence les principaux ordres de grandeur** qui sont difficilement identifiables au milieu de tableaux de chiffres souvent incomplets et détaillant peu l'articulation entre hypothèses et résultats. La comparaison des revenus annuels et des coûts d'exploitation est un point clé pour la compétitivité du projet et pour sa viabilité dans la durée. En l'espèce, la VAN financière hors aide à l'investissement est peu éloignée de l'équilibre, alors que l'on sait que le coût de l'hydrogène vert produit va être de l'ordre de quatre fois au moins celui de l'hydrogène gris aujourd'hui. Le fait que la VAN financière soit évaluée proche de l'équilibre est sans doute dû à l'hypothèse d'un prix de l'hydrogène gris qui, au cours de la période, rattrape assez rapidement celui de l'hydrogène vert du fait d'une hausse anticipée importante du prix du CO₂ dans le cadre du système de permis d'émissions de l'Union européenne et de l'évolution anticipée du prix du gaz naturel (utilisé

pour le vaporeformage). Ces hypothèses structurantes mériteraient d'être explicitées et partagées entre les pouvoirs publics et le porteur de projet.

- **Puis en développant une analyse des risques associés aux incertitudes pesant sur ces hypothèses.** En particulier, les évolutions possibles de la concurrence internationale sur les marchés des principaux usages (les engrais d'abord, puis les usages transports) et de l'hydrogène bas carbone (les coûts des électrolyseurs et de l'électricité variant avec la zone géographique et les progrès technologiques) devraient être développées. L'évolution des politiques publiques européennes (prix du CO₂, taxe aux frontières et son design précis, subventions diverses) et leur crédibilité est bien sûr un point fondamental souvent évoqué, mais sans considération de leur soutenabilité économique.

Cette discussion précise de la VAN financière et des hypothèses sous-jacentes devrait être un préalable avant de passer à la VAN socioéconomique (ou VAN-SE). En particulier, les hypothèses d'évolution des prix du gaz et du CO₂ mériteraient d'être davantage étayées. En outre, sur la base de ces hypothèses, le *funding gap* semble relativement modeste, et tient donc peut-être d'abord à la différence de taux d'actualisation utilisé qu'il est important de comprendre et d'interpréter (3,5 % pour la VAN-SE, contre 9 % pour la VAN-FI), ce qui pose incidemment la question de la prise en compte du risque dans le calcul de la VAN-SE. Par ailleurs, le niveau élevé de cette dernière s'explique en grande partie par celui de la valeur d'action pour le climat, ce qui pose la question de l'écart entre cette dernière et le prix effectif du CO₂.

Une analyse des risques complète intégrant les différents aspects évoqués, y compris le risque de non-viabilité du projet, est donc indispensable dans la présentation de la VAN-SE pour éclairer la décision des pouvoirs publics.

La VAN-SE

La présentation de la VAN-SE utilisée dans ces projets n'est pas habituelle, car elle n'est pas construite en écart à la VAN financière en y ajoutant les coûts et bénéfices liés aux externalités non prises en compte dans les prix (y compris la différence sur le taux d'actualisation) ainsi que dans les instruments économiques des politiques publiques :

- Cette approche rend ainsi plus difficile d'éviter les doubles comptes : en particulier, le bénéfice de la réduction de CO₂ semble ici comptabilisé deux fois. Une première fois par l'utilisation d'une valeur tutélaire du carbone (dans le compte de l'État) et une seconde fois par des coûts évités provenant des émissions de CO₂ associées à la production d'hydrogène gris (dans le compte du producteur d'engrais). Le projet risque d'être rendu artificiellement plus rentable et la positivité de la VAN-SE s'en trouve ainsi augmentée. Ceci est d'autant plus vrai que l'on ne s'est pas suffisamment interrogé sur les alternatives

bas carbone. En effet, celles-ci, si elles existent, pourraient servir de point de comparaison pertinent pour calculer les gains du projet en termes d'émissions évitées. La décarbonation par captage et stockage des process industriels existants peut notamment constituer une alternative à considérer par défaut.

- Il est également tentant de prendre en compte d'autres externalités, ce qu'il convient de faire, mais qui peut poser une question de cohérence avec les prix de marchés mobilisés. Le périmètre d'analyse peut être non cohérent *in fine*.

Le poids dans la VAN-SE des économies de CO₂ liées à l'ensemble de ces projets écrase toutes les autres dimensions des bénéfices associés, et suffit à rendre les VAN-SE largement positives dès lors que l'alternative émet du carbone de façon significative. Cela pose une question fondamentale sur laquelle on reviendra¹, concernant la nécessité de bien réfléchir à ce que l'on met derrière les grandes finalités – bas carbone, compétitivité de long terme, souveraineté et industrialisation –, à la manière d'articuler ces finalités sur le fond et de les valoriser en s'assurant à la fois de la cohérence entre approche globale et approche marginale, et de la pertinence/soutenabilité des politiques publiques associées.

Enfin, plus largement, les autres dimensions des projets – les emplois dont on considère par convention qu'ils représentent 50 % de la valeur ajoutée, l'innovation et la réindustrialisation, la souveraineté et la sécurité d'approvisionnement, les conséquences pour les territoires – sont évoquées mais sans impact significatif sur la VAN-SE, et souvent sans développement qualitatif permettant d'en tenir compte dans les décisions.

Après avoir tiré parti des principales discussions et des interrogations sur cette ESE consacrée à un projet hydrogène, le groupe de travail a pu reprendre ces questionnements sur d'autres évaluations du secteur énergétique, aux caractéristiques et aux enjeux différents mais complémentaires.

2. Les autres projets au stade du déploiement potentiel : batteries et décarbonation de l'acier

Si les éléments décrits dans la première partie apparaissent également dans les ESE menées sur le secteur des batteries et les projets de décarbonation de l'acier, d'autres points sont à noter et à préciser dans un contexte d'ensemble assez différent.

Le secteur de l'hydrogène se caractérisait par des interrogations fortes sur la maturité des marchés. Le secteur des batteries (point 2.1.) se caractérise au contraire par une maturité plus

¹ Voir Chapitre 2, section 2, p. 34.

avancée – l'Europe a longtemps été pionnière dans ce secteur – avec des technologies bas carbone éprouvées et par un marché fortement concurrentiel dominé par la Chine. De son côté, le secteur de l'acier (point 2.2.) est composé de grands groupes industriels confrontés à une très forte concurrence internationale et disposant de technologies de décarbonation partielle dont certaines sont proches de la maturité technique, mais avec un marché spécifique de l'acier bas carbone qui aujourd'hui n'existe pas encore. Il apparaît important de s'intéresser en ce sens aux particularités de ces projets et de leurs évaluations socioéconomiques.

2.1. Batteries

Les projets d'usines de batteries

Le domaine étudié dans le groupe de travail concerne le marché des véhicules électriques qui est devenu en quelques années un marché mondial largement dominé par la Chine avec une concurrence internationale forte sur tous les maillons de la chaîne, notamment sur les batteries et les véhicules électriques eux-mêmes.

Par conséquent, les deux préoccupations déjà rencontrées dans le marché naissant de l'hydrogène bas carbone sont bien plus fondamentales encore pour la viabilité de ces projets :

- la maîtrise du passage du prototype à l'échelle industrielle de *gigafactories* et avec un déploiement encore plus massif ;
- la compétitivité à long terme dans la concurrence européenne et internationale.

S'ajoute à ces préoccupations la question de l'accès aux ressources minérales critiques.

Dans ce contexte, l'ESE-batteries devrait dans ses deux premières parties couvrir davantage les sujets suivants :

- Les difficultés rencontrées en Europe dans le passage à l'échelle industrielle montrent bien le rôle clé des lignes pilotes, des prototypes et de leurs enseignements, la nécessaire mobilisation de compétences scientifiques et industrielles, l'importance de rapprocher laboratoires et chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'usine au niveau même des lignes de production industrielles pour résoudre tous les problèmes techniques rapidement et pour limiter au plus vite les taux de rebuts en améliorant les procédés en continu. On ne peut passer au stade de la *gigafactory* avant d'avoir résolu les problèmes techniques rencontrés sur la ligne pilote, notamment ceux liés à l'outillage et aux robots. L'expérience de la maîtrise de grands projets industriels, des compétences de R & D fortes (impliquées notamment au stade du passage à l'échelle industrielle), la qualité de la gouvernance du projet et de l'équipe sont fondamentales et devraient être évaluées. Ces questions

peuvent être posées dans d'autres instances, mais elles doivent être examinées dans l'ESE et se trouver au cœur de ses analyses.

- La compétitivité industrielle par rapport aux principaux concurrents devrait être abordée plus clairement et le business plan doit en tenir compte. Le choix de la technologie en fait partie : le choix des batteries NMC (nickel manganèse cobalt)¹ en France pour le moment interroge, alors que les batteries LFP (lithium fer phosphate)², qui avaient fait l'objet de brevets et d'innovations en France, sont aujourd'hui moins chères et constituent un élément de la réussite de la Chine. Examiner davantage les alternatives permettrait aussi de s'interroger sur l'intérêt de faire venir des entreprises chinoises en France pour monter en compétence plus rapidement et être moins loin des Chinois en termes de compétitivité, sous réserve de transferts de technologie, comme la Chine l'a exigé des entreprises françaises qui se sont installées sur son territoire.

De façon plus générale, on mesure avec ce type de projets combien il est décisif pour le bilan du projet d'appréhender les différences de coûts entre les acteurs qui sont en concurrence dans le contexte de la mondialisation.

Une vision plus précise des raisons expliquant les différences de coûts avec la Chine aurait permis de discerner – au moins en ordre de grandeur – la part liée aux surcapacités, aux subventions et aux réglementations environnementales ou sociales moins exigeantes, et la part liée au management, à une maîtrise industrielle (dont le prix des intrants) et à une organisation globale (robotisation, chaîne intégrée et cohérente, laboratoires et usines proches à toutes les étapes). Cette analyse aurait permis également d'identifier le bon mix de politiques publiques (tarifs douaniers, taxes CO₂ aux frontières, politiques industrielles, etc.) permettant d'accompagner la montée en puissance industrielle en France, en anticipant le coût dans la durée pour éviter les « stops and go » et les annonces non crédibles.

La préparation du long terme sur des technologies prometteuses : s'inspirer des meilleures pratiques, notamment en Chine ?

Le dossier des batteries offre l'occasion de traiter de considérations stratégiques importantes que l'ESE se doit d'intégrer dans son analyse et d'éclairer. Les stratégies possibles sont nombreuses, elles présentent toutes des avantages et des inconvénients, certaines sont plus

¹ La technologie NMC désigne une formulation de batteries lithium-ion utilisant du nickel, du manganèse et du cobalt. Elles permettent de stocker plus d'énergie dans un espace plus réduit que les batteries traditionnelles, offrant ainsi une meilleure autonomie.

² Ce type de batterie se caractérise par l'absence d'éléments en métaux critiques. En utilisation réelle, les batteries au lithium fer phosphate présentent notamment les avantages d'une résistance à haute température, de meilleures performances de cycle et surtout d'un coût inférieur.

risquées que d'autres. Ce type d'analyse concernant les stratégies possibles et celles mises en œuvre par nos principaux concurrents devrait être explicité et développé en amont des projets, au niveau des feuilles de route et de leurs ESE. Cela permettrait aux projets de s'y référer et aux évaluateurs d'en tenir compte.

La France ne peut pas, comme le font la Chine ou les États-Unis, explorer tout le champ des possibles. Il faut donc faire des choix. Dans un secteur qui évolue rapidement, on peut se demander s'il ne faudrait pas avancer sur le passage à des prototypes de technologies de TRL plus bas, mais qui pourraient émerger rapidement, comme le sodium-ion ou les batteries solides. Il faudrait ne pas répéter l'erreur commise sur la technologie LFP, que la France n'a pas cherché à développer malgré une maîtrise acquise au stade scientifique.

De ce point de vue, pour développer des technologies performantes de batteries en France, il pourrait être utile de bien comprendre la stratégie mise en œuvre efficacement par la Chine ces dernières années pour assurer la maturité industrielle des technologies NMC et LFP, même si son coût pour les finances publiques ne doit pas être ignoré :

- avoir une vision intégrée de la nouvelle filière industrielle, les mines et les raffineries pour les matériaux critiques, la fabrication des composants clés anodes-cathodes-électrolytes, la maîtrise de la fabrication des modules et des batteries, et la maîtrise des machines-outils et de la robotisation des chaînes de montage ;
- mobiliser les compétences de R & D à toutes les étapes du développement du projet, depuis la conception en laboratoire et les premiers prototypes d'équipement et de lignes de fabrication jusqu'aux lignes de production et de déploiement : ce qui suppose une forte articulation entre les laboratoires de recherche et les usines de production ;
- cibler d'abord des marchés de niche robustes et « sans regret¹ » (au début, en Chine, des flottes de bus ou de taxis pour lutter contre la pollution locale dans les villes, etc.). Ce n'est qu'une fois la maturité économique atteinte que le déploiement sur des marchés de masse est envisagé.

On peut ajouter que les Chinois ont réalisé le déploiement de véhicules électriques d'abord pour des raisons de souveraineté et de sécurité d'approvisionnement (limiter les besoins en pétrole importé, en s'appuyant sur l'électricité à base de charbon et de technologies bas carbone hydraulique, ENRi et nucléaire fabriquées en Chine), et de compétitivité (déploiement du véhicule électrique quand il est moins cher que le véhicule à essence) avec une électricité à coût maîtrisé grâce au charbon (60 %) et à l'hydraulique, ainsi que pour limiter les pollutions urbaines. Si la Chine maîtrise une technologie qui sera bas carbone à l'avenir

¹ Soit des marchés où des bénéfices sont quasiment assurés.

lorsque le mix électrique chinois sera lui-même bas carbone, ce n'est pas le cas aujourd'hui ni à court-moyen terme. Le déploiement des véhicules électriques diminue certes un peu les émissions de CO₂ des prochaines décennies dans le pays mais la lutte contre le changement climatique n'était pas la première raison de cette stratégie volontariste.

Ces remarques montrent tout l'intérêt de disposer dans les ESE des éléments qui permettent de préciser le moment où les technologies deviennent pertinentes et la façon dont elles s'articulent avec les finalités poursuivies (décarbonation, souveraineté, compétitivité, etc.).

2.2. Décarbonation de l'industrie : l'exemple de l'acier

Le secteur de la décarbonation de l'acier s'accompagne de difficultés nouvelles par rapport à l'hydrogène ou aux batteries, en termes technologiques, industriels et de marché. D'où l'intérêt d'examiner ces différents éléments de manière précise.

Plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées pour réduire les émissions d'une aciérie. Elles n'ont pas toutes les mêmes niveaux de TRL. Il apparaît donc nécessaire d'être là aussi plus précis sur les niveaux de maturité technologique et économique des options de décarbonation :

- La réduction directe au gaz naturel pour traiter le minerai de fer (décarbonation partielle) et les fours à arc électriques pour recycler l'acier (bas carbone) sont des technologies matures, déjà existantes à l'échelle industrielle. Elles sont économiques dès lors que les coûts du gaz naturel et de l'électricité, ainsi que les qualités des minerais de fer ou de l'acier recyclable, le sont.
- A contrario, la substitution du gaz par de l'hydrogène bas carbone n'est pas mature techniquement et a fortiori économiquement, si bien qu'il peut paraître étonnant de voir présenter cette option presque sur le même plan en termes de maturité que les deux précédentes.
- Les systèmes de captage et stockage du CO₂ sont complexes techniquement. Ils peuvent être associés à la réduction du gaz comme aux hauts-fourneaux utilisant le charbon, mais ils restent à tester à l'échelle industrielle et seraient probablement coûteux.
- Enfin, l'électrolyse basse-température du minerai de fer apparaît comme une technologie prometteuse, mais dont la maturité technique est encore insuffisante, et dont la maturité économique dépendra bien sûr des coûts de l'électricité.

Au-delà des coûts d'investissement, les coûts des principaux intrants – énergie (gaz, électricité *versus* charbon) et minerais de fer selon leur qualité – sont autant d'éléments déterminants sur les charges d'exploitation. L'anticipation de leurs niveaux à moyen et long terme selon les

zones géographiques, et les coûts du minerai de fer accessible sont les éléments majeurs de la VAN financière et demanderaient des analyses et une discussion approfondies.

Les risques de délocalisation sont dès aujourd'hui importants face à la forte concurrence internationale, et d'autant plus dans un contexte d'investissements lourds qui doivent être réalisés par ces industriels. Au point que certains pourraient se demander si la délocalisation ne constituerait pas l'option de référence dont le résultat serait certes la baisse des émissions directes de carbone en France, mais au prix d'une poursuite de la désindustrialisation, avec des impacts négatifs sur la sécurité d'approvisionnement dans des secteurs clés (défense, etc.) et *in fine* des conséquences pour la planète défavorables en termes d'émissions de CO₂ si nous importons, directement ou dans les biens que nous achetons, de l'acier encore plus carboné qu'aujourd'hui. Ce qui amène là aussi à s'interroger sur les objectifs de décarbonation en relation avec les autres finalités, souveraineté et compétitivité économique à long terme. Les hésitations d'ArcelorMittal comme les difficultés d'autres projets de décarbonation dans l'industrie illustrent bien la nécessité de prendre en compte l'intensité de la concurrence internationale et les enjeux de réindustrialisation et de souveraineté du pays.

Cela milite pour que l'ESE examine systématiquement des solutions qui privilégient les finalités de compétitivité économique à long terme et de souveraineté pour conserver ces activités durablement sur le sol français, parallèlement à des solutions de décarbonation totale ou partielle. Des combinaisons de solutions flexibles doivent aussi pouvoir être envisagées.

3. La préparation de l'avenir sur des technologies non matures : l'exemple des petits réacteurs nucléaires

La dernière réunion du groupe de travail portait sur un ensemble de projets relativement éloignés de la maturité technologique, pour lesquels il est peu aisé de calculer des VAN financières et des VAN-SE : les réacteurs nucléaires SMR et AMR.

3.1. Les projets de SMR-AMR de France 2030

L'appel à projets lancé dans le cadre du plan France 2030¹ a permis des réponses de start-ups sur un périmètre très large, avec un ensemble de projets très différents en termes technologiques (réacteurs de fission modérés à l'eau par du graphite, ou non modérés ; refroidis par eau, gaz, sodium, plomb ; et même deux projets de réacteurs de fusion), en

¹ Voir sur [le site de BPI France](https://www.bpi.fr/fr).

termes de combustibles et en termes d'usages (chaleur par des réseaux de chaleur/haute température pour l'industrie, électricité et fermeture du cycle).

Il s'agit dans presque tous les cas de développer non seulement un système industriel complexe (réacteur nucléaire), mais aussi une filière industrielle avec notamment le cycle du combustible associé (fabrication du combustible, éventuel retraitement et destination du combustible usé et des déchets). La complexité de ces deux dimensions a été insuffisamment prise en compte par la plupart des porteurs de projets, ce qui a conduit à sous-estimer :

- le temps nécessaire pour mettre au point les chaînes de fabrication du combustible ;
- le temps nécessaire pour qualifier les matériaux-clés des réacteurs comme leur niveau de sûreté.

Or, notamment sur ces deux dimensions, les horizons de temps requis sont bien supérieurs à ceux attendus classiquement pour un retour d'investissement dans le monde des start-ups.

Les maturités des technologies étant, pour la plupart, éloignées, il paraît difficile d'élaborer au stade actuel des business plans fiables. C'est donc d'abord sur la qualité technique et la crédibilité des différents aspects scientifiques, ainsi que sur la qualité de l'équipe-projet, que l'on peut évaluer les avantages et les faiblesses des projets : cycle du combustible, réacteurs/technologies, sûreté, maîtrise des risques de prolifération, professionnalisme et compétences de l'équipe. La qualification des matériaux sous irradiation et le cycle du combustible sont les deux aspects clés souvent moins abordés et moins maîtrisés par les porteurs de projets.

L'évaluation conduite par le Haut-Commissaire à l'énergie atomique en juin 2024 l'a été dans cet esprit et précisément en utilisant ces critères, particulièrement pertinents pour cette phase, en mobilisant des compétences indépendantes de haut niveau sur le plan scientifique et industriel qui ont permis aux équipes-projet de progresser sur ces différents aspects.

3.2. Pour un ciblage plus précis des projets sur les principaux besoins

Repartir d'une analyse des besoins pour le système énergétique français en les hiérarchisant par ordre d'importance et d'horizon temporel

Les discussions au sein du groupe de travail ont clairement fait ressortir la nécessité de mobiliser, en amont même des ESE, une analyse des besoins du système énergétique français selon les horizons de temps et une analyse de la place que devraient y trouver les différentes technologies nucléaires en fonction de leur maturité. Sans ce cadrage qui relève d'une feuille de route générale, les ESE peinent à atteindre leur objectif et leurs résultats peuvent s'en trouver fortement fragilisés.

Ont été évoqués notamment les points suivants :

- le premier enjeu est de prolonger le parc existant et d'augmenter sa capacité de production et sa disponibilité (augmenter son coefficient de disponibilité K_d^1 et son coefficient d'utilisation K_u^2). En effet, par la capacité qu'il représente, le parc nucléaire existant constitue le potentiel le plus important et le plus économique en termes d'électricité bas carbone, permettant d'accompagner les premiers pas en direction de l'électrification des usages pour ces prochaines années (2025-2035/2040).
- Le parc nucléaire devra tôt ou tard être renouvelé et étendu en capacité, notamment au-delà de 2035-2040, par des réacteurs de troisième génération. Ces réacteurs devraient atteindre le niveau de coût des meilleurs compétiteurs dans le monde. C'est l'enjeu du programme EPR2.
- L'étape suivante est la préparation de la fermeture du cycle du combustible, à l'horizon de la deuxième moitié du siècle, à savoir l'utilisation par les réacteurs à neutrons rapides (quatrième génération) de l'isotope 238 de l'uranium, en plus de l'isotope 235 aujourd'hui utilisé. Ces réacteurs permettraient en effet l'utilisation du plutonium issu des combustibles usés, et surtout du stock d'uranium appauvri qui peut d'ores et déjà assurer la sécurité d'approvisionnement de la France pour de nombreux siècles. À cette fin, la technologie sodium, déjà mature sur le plan technique, semble l'option la plus pertinente pour la France aujourd'hui. Il conviendrait donc d'en garantir la compétitivité économique par un design simple et robuste, en revisitant les designs envisagés dans les années 1990 à la lumière des avancées technologiques et scientifiques. Le référentiel de sûreté devrait également être conçu pour ce type de réacteurs en prenant en compte ses faiblesses, mais également ses qualités, en particulier l'inertie thermique du sodium. Enfin, le réacteur s'inscrivant dans un système industriel global, il doit être pensé en relation avec les chaînes de fabrication du combustible et les outils du cycle associés (ce qui n'exclut pas bien sûr des actions ciblées en termes de R & D ou de coopération internationale sur d'autres options technologiques, comme des réacteurs au plomb ou à sels fondus).
- en quatrième position des enjeux dans la durée pour le nucléaire français, il convient de noter la possible contribution des réacteurs nucléaires de petite taille (SMR) à la production de chaleur (chaleur industrielle ou pour alimenter des réseaux de chaleur urbains). Sachant que cette contribution peut être directe via des réacteurs de petite taille

¹ K_u est le taux de puissance disponible utilisé. Le coefficient de production K_p (disponibilité globale) est égal à la production réelle ramenée à celle qu'aurait le parc s'il fonctionnait à sa puissance nominale pendant les 8 760 heures de l'année, soit $K_p = K_d \times K_u$. Il est exprimé en pourcentage.

² Ce coefficient K_u donne le nombre d'heures pendant lequel le parc est utilisé à 100 % pendant sa disponibilité. Il est donné en pourcentage.

dédiés ou en cogénération, directe via la cogénération sur des réacteurs de grande taille, ou indirecte via l'électricité nucléaire et des pompes à chaleur industrielles (le rendement énergétique dans ce dernier cas étant de l'ordre de 1).

Concernant les enjeux associés aux designs des réacteurs électrogènes de petite taille et de génération 3, il n'est pas inutile de rappeler les raisons qui sont à l'origine de leur développement ces deux dernières décennies à l'échelle internationale. La question des SMR électrogènes (de génération 3) dans la gamme des 200-500 MW (celles des premiers réacteurs dans les années 1950 et 1960) s'est posée aux États-Unis à la fin des années 1990, d'abord en raison de la difficulté à maîtriser les coûts de construction des centrales de grande taille (1 000-1 500 MW), ensuite du fait de l'existence d'un marché potentiel pour des centrales de ce type, liée à la nécessité de remplacer des centrales charbon de capacité équivalente sur les mêmes sites¹. Le pari consistait alors à chercher à compenser les gains importants liés à l'effet de taille unitaire par un effet de série, grâce notamment à la préfabrication de modules importants en usine et à la simplification du design. Face à la difficulté de traduire ces promesses dans la réalité jusqu'à présent, les acteurs se tournent alors vers des marchés potentiels favorables pour ce niveau de taille ; des réseaux peu interconnectés où existent déjà des sites de centrales thermiques à remplacer. Les projets qui sont les plus avancés avec des perspectives de construction sont pour l'essentiel portés par de grands acteurs du nucléaire comme GE (voir par exemple son projet au Canada avec Ontario Power Generation) capables de maîtriser la complexité de ces projets avec une stratégie de développement international et la nécessité de favoriser une convergence des autorités de sûreté sur les référentiels pour permettre des effets de série. Signalons sur ce même créneau le soutien du Royaume-Uni pour un SMR Rolls Royce et le travail d'EDF avec le projet de réacteur Nuward.

Les enjeux ne sont pas les mêmes pour le système électrique français qui bénéficie comme la plupart des réseaux du centre-ouest de l'Europe d'une forte interconnexion cohérente avec des unités de production de grande taille (1 000-1 500 MW). En revanche, la France, acteur majeur du nucléaire, pourrait souhaiter explorer cette opportunité internationale dans l'avenir en complément des axes précédents, mais sur la base d'une analyse appropriée du contexte, des possibilités de partenariats, des risques associés et des obstacles à lever pour se donner toutes les chances de succès.

Ajoutons pour compléter le paysage que les designs des réacteurs de taille plus petite (1-5 MW et 10-50 MW) sont portés notamment aux États-Unis par des acteurs dont certains sont des start-ups. Mais ces projets sont alors le plus souvent encadrés et soutenus par le DOE (Department of Energy) et liés aux besoins du Pentagone, de l'alimentation des bases militaires

¹ Car les contraintes des réseaux de transport d'électricité aux États-Unis permettent difficilement de modifier la localisation des capacités de production.

à la propulsion sous-marine, marchés spécifiques dont le potentiel serait suffisant pour lancer des premières séries.

Au total, on mesure combien ces développements débordent l'analyse coûts-bénéfices d'un projet particulier et relèvent clairement du registre de l'élaboration d'une feuille de route nationale du nucléaire et SMR pour la France. L'ESE d'un projet particulier ne peut pas être correctement réalisée sans s'appuyer sur ce niveau stratégique indispensable. Et l'intérêt d'une telle feuille de route ne tient que si les objectifs et le chemin qu'elle propose s'accompagnent de l'explicitation des raisons qui les justifient, ce qui passe nécessairement par une démarche similaire à celle engagée dans les ESE : examen de la robustesse scientifique, industrielle et économique, identification des facteurs de risque et analyse approfondie du contexte international.

Sur la base des « justes besoins » et de la maturité scientifique et industrielle, on devrait pouvoir réduire le nombre d'options techniques pertinentes et mieux réfléchir à leurs conditions de réussite

Compte tenu de ses moyens et de ses enjeux, la France aurait intérêt à se concentrer sur les technologies qu'elle maîtrise et connaît le mieux, et qui correspondent aux besoins identifiés. C'est donc en priorité sur la filière sodium que son attention devrait sans doute se porter, tout en continuant à explorer un petit nombre d'options prometteuses, dont peut-être la filière des réacteurs nucléaires à haute température HTR (à articuler avec une stratégie de coopération internationale).

Une fois le nombre d'options techniques ainsi restreint, il semblerait pour le groupe de travail nécessaire d'identifier les conditions pour assurer leur réussite à l'échelle industrielle. Les difficultés des projets RJH (réacteur de recherche Jules Horowitz) et EPR (réacteur pressurisé européen), pilotés respectivement par le CEA et EDF, ont montré l'importance cruciale des compétences de pilotage industriel et scientifique de grands projets particulièrement complexes et soumis à des contraintes réglementaires fortes. Les projets de SMR, notamment les réacteurs sodium et HTR, présentent des niveaux de complexité similaires, donc les mêmes exigences en termes de pilotage. De tels projets, avec des dimensions filière et systèmes industriels complexes, requièrent des compétences fortes et confirmées de pilotage, tant au niveau de la maîtrise d'ouvrage (MOA) que de la maîtrise d'œuvre (MOE). Or, si les exemples du RJH et de l'EPR montrent que EDF et le CEA doivent remonter en compétences en s'inspirant des meilleures pratiques internationales, et en n'hésitant pas à s'appuyer sur des partenaires expérimentés, les start-ups (et leur modèle de développement) sont peu adaptées pour assurer seules le pilotage de tels projets. Un des risques est de voir ces projets, après avoir bénéficié de financements publics, ne pas aller au bout, faute d'avoir trouvé des financements privés adéquats et surtout si des clients industriels ne se sont pas sérieusement engagés.

En témoigne le fait qu'aux États-Unis, la NASA ou le Pentagone ne font pas appel à des start-ups pour leur confier des programmes-projets de cette ampleur. Éventuellement, ils peuvent faire appel à de grands acteurs privés disposant d'une surface industrielle et financière comparable, voire supérieure, à celle du CEA ou d'EDF, à l'instar des entreprises de Jeff Bezos ou d'Elon Musk, qui sont toutefois toujours cadrés par la NASA, le Pentagone ou le DOE et qui s'appuient fortement sur leurs compétences scientifiques et techniques. L'appel à des start-ups peut ensuite se faire, ponctuellement, pour des parties de grands projets spécifiques, ou des projets de taille et de complexité inférieures.

En s'appuyant sur les meilleures pratiques, on pourrait aller plus loin sur trois registres : les besoins de la France, la sélection des projets et la gouvernance

Prendre appui sur les exemples des meilleures pratiques, aussi bien dans d'autres secteurs comme le spatial, l'aéronautique ou la défense que dans le nucléaire à l'international, permettrait d'approfondir trois dimensions clés :

- mieux spécifier en amont les besoins précis de la France, compte tenu de ses caractéristiques économiques, politiques et de sa position dans le monde ;
- établir une hiérarchisation puis une sélection des projets utiles et susceptibles d'être pour tout ou partie financés par l'État. Cela permettrait d'éviter le saupoudrage et de cibler l'intervention publique en la concentrant sur les projets à la fois les plus pertinents pour le pays et les plus susceptibles d'aboutir.
- enfin, mettre en place une gouvernance adéquate à de tels projets, qui maximise leurs chances de réussite, avec un commanditaire public, une MOA et une MOE de « grande taille », et sollicitant ponctuellement, pour des aspects bien précis et définis, les capacités d'innovation du niveau start-ups.

Pour ces projets très innovants dont l'horizon de déploiement est éloigné, la qualité de la feuille de route et de l'appel à projets est encore plus importante et plus déterminante pour cadrer les projets et pour faciliter l'élaboration des ESE.



CHAPITRE 2

FEUILLES DE ROUTE STRATÉGIQUES, FINALITÉS ET PROCESSUS D'ÉVALUATION : L'AMONT DES PROJETS

L'analyse précédente a tiré parti des nombreuses interrogations que soulève l'analyse du contenu des évaluations sur les grands projets du secteur énergétique. À chaque fois, on mesure l'importance qu'il y a à disposer, pour réaliser une ESE, d'une feuille de route plus générale qui définit et précise les grands paramètres nécessaires. Sans feuille de route précise, il devient difficile d'établir une ESE cohérente, pertinente et robuste. Cette feuille de route devrait elle-même faire l'objet d'une ESE. La cohérence des références et des méthodes dans ces deux étapes de la démarche évaluative devrait être assurée, faute de quoi les ESE sur les projets perdent une grande partie de leur intérêt.

Par ailleurs, la méthodologie de lancement et d'évaluation de ce type de projets devrait prendre davantage en compte la dimension très évolutive du contexte. On constate en effet qu'entre le lancement du projet, la mise en œuvre de l'appel d'offre, les réponses et les décisions d'engagement, les situations peuvent changer de façon importante : la filière hydrogène est loin de se mettre en place comme envisagé, la décarbonation de l'acier a vu l'intérêt des industriels retomber et les SMR suscitent des questions sur le rôle des start-ups dans le développement de la filière.

D'où l'importance de disposer pour l'élaboration des feuilles de route de compétences concernant les risques, les options à ouvrir et les conditions de réussite de leur mise en œuvre. D'où l'importance également de mettre en place un suivi des projets et un retour d'expérience avec une boucle courte et rapide vers les feuilles de route et la stratégie.

1. Feuilles de route stratégiques et politiques publiques

1.1. L'importance des feuilles de route stratégiques

La stratégie des pouvoirs publics et les feuilles de route des filières associées sont déterminantes pour le contenu des appels à projet : elles fournissent des éléments-clés aux porteurs de projet pour mener leurs analyses coûts-bénéfices.

La pertinence et la robustesse de ces cadrages sont fondamentales pour la réussite des projets. Il faut pour cela s'assurer que les questions posées aux porteurs de projet (évoquées au Chapitre 1) l'ont été également au niveau des feuilles de route des filières ainsi qu'à celui de la stratégie énergétique du pays. L'évaluation socioéconomique au niveau des projets (« l'approche projet ») doit être cohérente avec une évaluation de même inspiration au niveau des feuilles de route et de la stratégie (l'« approche globale ») dont le rôle est de prendre en compte de façon plus spécifique, en amont des projets, les dimensions « systèmes » : filières industrielles et système énergétique et électrique.

1.2. Trois axes de progrès

Les documents publiés accessibles au groupe de travail dans cette première phase ont mis en évidence trois axes de progrès de ce point de vue.

Un renforcement de l'analyse des maturités scientifiques, industrielles et économiques des systèmes industriels

Pour ne retenir qu'un exemple, la feuille de route hydrogène de 2018 prévoyait un rapprochement presque total des prix de l'hydrogène vert et de l'hydrogène gris à un horizon d'une dizaine d'années. Une telle hypothèse pouvait laisser entendre qu'en dehors des subventions à l'investissement pour des usines d'électrolyseurs, la production serait compétitive dès cet horizon. Cette hypothèse, qui aurait dû être remise en question déjà en 2018, devrait être abandonnée depuis plusieurs années au vu du retour d'expérience.

La prise en compte des effets « systèmes » et des enjeux de cohérence temporelle des filières industrielles

Il y a deux aspects clés à prendre en compte dans les feuilles de route : la dimension intégrée de la filière industrielle de la mine aux déchets, et le choix de la déployer massivement au moment opportun, c'est-à-dire au moment où elles sont compétitives et avec un marché. L'absence d'anticipation de ces deux volets dans les feuilles de route met en danger

aujourd'hui de nombreux projets pourtant intéressants pour l'avenir, mais qui arrivent ou trop tôt ou trop tard. On connaît pourtant les étapes à franchir pour faire passer ces filières bas carbone à l'échelle du déploiement industriel et de la compétitivité économique :

- identifier et lever les verrous scientifiques et techniques ;
- rapprocher laboratoires et chaînes de production à tous les stades de développement en impliquant des compétences de R & D ;
- avoir une vision intégrée des filières techniques de la mine aux déchets avec une attention particulière pour les intrants clés (énergie et matériaux critiques) et les machines-outils ;
- avoir une idée claire et à jour des maturités techniques et économiques, avec toujours un plan A et un plan B ;
- enfin, comme évoqué, ne passer au développement massif que si on a atteint une maturité technique suffisante au niveau des lignes pilotes, et que l'on peut espérer être compétitif et avec un marché.

C'est ce qu'ont fait les Chinois, notamment sur les batteries et les véhicules électriques, en travaillant d'abord à la maîtrise industrielle de l'ensemble des maillons de la filière, en s'adressant d'abord à des marchés de niche, avant de se fixer des objectifs plus ambitieux de déploiement, une fois atteinte la compétitivité avec les véhicules à essence. C'est l'inverse que nous avons fait jusqu'à présent, ce qui explique sans doute une part importante des difficultés des projets évalués dans ce secteur.

Les prix de l'énergie, notamment de l'électricité, jouent un rôle important voire crucial pour la plupart des projets examinés

Les feuilles de route et les documents publics associés ont également montré l'intérêt d'une meilleure prise en compte des dimensions systémiques des projets, et d'abord de l'électricité et de son rôle crucial. En effet, les performances économiques du mix production-réseaux-usages jouent un rôle majeur dans la décarbonation, elles doivent donc être davantage analysées et, là encore, anticipées. Il serait en particulier nécessaire d'étudier avec attention les effets d'un taux de pénétration plus élevé des énergies renouvelables intermittentes sur les prix de l'électricité, notamment les impacts associés sur les réseaux et les besoins de stockage. Il serait de même utile de vérifier les équilibres entre offre et demande à moyen et long terme, ce qui implique de s'assurer de la cohérence entre les rythmes d'électrification des usages et d'évolution du mix, là encore pour la maîtrise des prix de l'électricité dans la durée.

Au total, on mesure que la pertinence de l'ESE pour la décision et le débat public dépend de sa capacité à intégrer ces différentes dimensions. Cela revient pour le porteur de projet à préciser les conditions qu'il faut réunir pour que le projet soit une réussite.

1.3. La cohérence et la crédibilité des politiques publiques constituent un volet important pour les projets

Une évaluation économique des impacts à long terme des principales politiques publiques comme des feuilles de route serait très utile de ce point de vue, en amont des projets.

2. Les finalités : décarbonation, souveraineté et compétitivité de long terme

Un des points qui ressortent des ESE présentées au groupe de travail est le poids prépondérant, dans le bilan des projets, de la valorisation du carbone évité par le projet, au regard d'autres enjeux et d'autres externalités. Cela traduit l'urgence pour la collectivité française de traiter la question du changement climatique, mais cela n'est pas sans interroger la manière dont on utilise ce référentiel et les précautions qu'il convient d'intégrer dans son usage pour ne pas minimiser d'autres enjeux aujourd'hui moins valorisés.

2.1. La valeur tutélaire du carbone ou valeur de l'action climat et son utilisation dans les ESE

Le poids pris désormais par la valeur de l'action climat (VAC) dans la VAN-SE pose problème : non seulement il réduit l'influence des autres « externalités » – comme l'emploi, la souveraineté ou l'innovation –, mais surtout il justifie la plupart des investissements dès lors qu'ils évitent des émissions de carbone. Il faut donc ouvrir les questions liées à son niveau, à son mode de calcul et à son utilisation dans les choix publics.

Le niveau de la valeur tutélaire du CO₂ et son articulation avec les autres enjeux, notamment la compétitivité et la souveraineté

Au-delà des questions techniques (choix d'un budget carbone à horizon 2050 ou de contraintes décennales ou annuelles, utilisation possible dans le premier cas du principe d'Hotelling pour caler l'évolution de son niveau dans le temps), le niveau élevé en moyenne de la valeur carbone sur les trois prochaines décennies est lié à l'ambition retenue par l'Union européenne et la France d'atteindre le net zéro émissions en 2050¹. D'autres grandes régions du monde ont pris une voie différente, au sens où elles conditionnent leurs engagements de décarbonation aux deux objectifs de compétitivité à long terme des technologies bas carbone

¹ Le décalage d'une ou deux décennies de l'objectif de net zéro émissions directes pour la France diminuerait sensiblement la valeur tutélaire moyenne du CO₂ sur la période 2030-2050.

par rapport aux technologies actuelles, et aux impératifs de souveraineté et de sécurité d'approvisionnement (ce qui est le cas aujourd'hui notamment des États-Unis, de la Chine et de l'Inde), quitte à sous-estimer le coût des dommages climatiques. La France (comme l'Europe) pourrait alors mettre en danger son niveau de vie économique, sa réindustrialisation et sa souveraineté. Sous-jacent à ce risque, le fond du problème, c'est que l'enjeu climatique est un bien commun planétaire et non français ou européen. Le calcul d'une valeur tutélaire purement française sur une contrainte prise à ce périmètre est par nature fragile et appelle une analyse approfondie du contexte et de ses impacts.

En effet, les efforts ambitieux engagés par la France pour lutter contre le changement climatique – alors que ses seules émissions directes pèsent très peu sur l'évolution du climat – auront un effet positif pour la planète et limiteront les dommages climatiques à une double condition :

- à condition premièrement d'inciter d'autres régions du monde à la suivre : cela suppose que la France s'appuie sur un modèle économique crédible, autrement dit qu'elle mette en place des technologies bas carbone dont les coûts sont maîtrisés et compatibles avec la prospérité du pays et sa sécurité d'approvisionnement, avec des politiques publiques associées efficaces. Ce n'est pas vraiment le cas aujourd'hui : la Chine et, sur certaines technologies innovantes, les États-Unis sont depuis une à deux décennies plus crédibles de ce point de vue que la France et l'Europe ;
- de sauvegarder sa souveraineté et sa prospérité, en tenant compte des émissions importées de carbone : la France qui affiche des objectifs plus ambitieux que d'autres pays doit être durablement protégée par des mesures aux frontières et par des mesures de réciprocité (appels d'offre publics, etc.). Mais on sait la difficulté qu'il y a à taxer de façon cohérente et efficace le CO₂ incorporé dans les biens importés. Et même si c'était le cas, la contrainte supplémentaire exercée sur l'économie du pays pourrait poser des problèmes sérieux dans un contexte géopolitique incertain et préoccupant. On sait aussi les conséquences négatives pour la planète d'une délocalisation des activités industrielles fortement consommatrices d'énergie vers des pays dont le mix énergétique est plus carboné (problème des fuites de carbone).

Les questions sur le mode de calcul de la valeur carbone

Les modélisations de l'économie internationale comme celles des secteurs-clés pour la décarbonation – notamment l'énergie et l'électricité – devraient faire l'objet d'une réflexion critique ouverte et ancrée sur les réalités, d'autant que ces exercices sont délicats, étant donné la fragilité des choix de modélisation et des bases de données.

Les problèmes de compétitivité et de représentation des échanges entre pays devraient faire l'objet d'une analyse tenant compte des évolutions récentes du contexte géopolitique et des

incertitudes concernant les prochaines années : il conviendrait notamment de bien anticiper les évolutions possibles des coûts relatifs de l'énergie d'un pays et leur impact sur sa compétitivité et sa croissance en intégrant des dimensions de macroéconomie internationales à moyen-long terme.

Les bases de données concernant les coûts des technologies bas carbone déployées au-delà de 2035-2040 sont particulièrement fragiles puisque la plupart de ces technologies ne sont pas encore matures. Par ailleurs, la plupart des modèles représentant des secteurs avec des dimensions systémiques et techniques complexes comme l'électricité (prise en compte des coûts des réseaux, coûts des moyens de pointe, gestions de stockage en avenir incertain, idem pour les contraintes techniques associées au temps réel, etc.) prennent peu en compte ces aspects spécifiques qui peuvent changer les mix optimaux (pour peu que l'on optimise économiquement les choix, ce qui n'est pas non plus le cas le plus souvent), ainsi que les ordres de grandeur économiques. C'est notamment pour ces raisons que la commission Quinet¹ a mis en avant la nécessité d'études plus précises sur les coûts d'abattement par secteur, dans le prolongement de la commission Criqui² – études qui peuvent être l'un des leviers pour avancer dans ces réflexions.

Utilisation de la valeur tutélaire du carbone, optimisation économique et « merit order » technologique dans l'approche globale et choix des alternatives dans l'évaluation des projets

L'approche économique globale utilisée par la commission Quinet trouve une incidence directe sur les projets où la valeur carbone est utilisée. La cohérence entre les approches projets et les approches globales – travaux d'estimation de la valeur de l'action pour le climat, travaux sur les coûts d'abattement, travaux sous-jacents aux feuilles de route des pouvoirs publics – doit donc être régulièrement interrogée. Dans l'approche globale, il faut s'assurer de l'empilement optimal des différentes technologies bas carbone pertinentes pour chaque secteur, afin de minimiser les coûts de la décarbonation. Dans l'évaluation des projets, il faut s'assurer de la place du projet au sein de cet « ordre de mérite » ce qui revient à poser au niveau de l'approche locale la question du choix des alternatives les plus efficaces à la technologie du projet. Le choix d'alternatives au projet ne doit donc pas reposer seulement sur des technologies actuelles fortement émettrices accompagnées d'un prix du CO₂ élevé, mais conduire à s'interroger à chaque fois sur l'existence de technologies bas carbone

¹¹ France Stratégie (2025), *La valeur de l'action pour le climat : une référence pour évaluer et agir*, rapport de la commission Alain Quinet.

² Voir la série de rapports sur les coûts d'abattement publiés par la commission présidée par Patrick Criqui : *Partie 1 – Méthodologie* (2021) ; *Partie 2 – Transports* (2021) ; *Partie 3 – Électricité* (2022) ; *Partie 4 – Hydrogène* (2022) ; *Partie 5 – Logement* (2022) ; *Partie 6 – Ciment* (2023) ; *Partie 7 – Acier* (2024).

alternatives efficaces. Il doit également tenir compte des enjeux de bouclage sur toutes les ressources finies (biomasse, surface non artificialisée etc.).

2.2. Les autres finalités

Compétitivité de long terme, souveraineté et industrialisation

Ces objectifs sont de même niveau logique que la décarbonation, existentiels pour le pays, et mériteraient d'être mis davantage en avant dans les réflexions méthodologiques et dans leurs déclinaisons au niveau du projet.

Les enjeux de souveraineté et de sécurité d'approvisionnement ne relèvent pas nécessairement d'une valeur tutélaire. Pour autant, il existe des grilles d'analyse classiques, utilisées en particulier dans la défense, l'armement et le spatial, naguère dans l'énergie, permettant d'examiner le mix de leviers possibles dans une réflexion intégrant toujours les enjeux de compétitivité et de puissance économique (liés intrinsèquement à une souveraineté « durable ») : diversification des approvisionnements, protection des transports maritimes et terrestres, stocks stratégiques, capacité à produire en cas de crise, production nationale.

Les autres enjeux qui méritent d'être mieux pris en compte de façon quantitative ou qualitative : emplois, innovation et territoires

Les évaluations des grands projets qui s'inscrivent bien souvent dans une stratégie de programme peuvent laisser dans l'ombre les nombreux impacts et enjeux d'un projet lorsque se pose la question de la mise en œuvre opérationnelle et particulièrement de la localisation. Souvent, ces aspects sont dans un premier temps négligés car ils paraissent secondaires par rapport aux bénéfices et aux coûts généraux qu'on considère du point de vue national.

Mais de fait, dans l'ESE d'un projet, de nombreuses questions se posent qui vont conditionner la bonne réussite du projet : intégration dans un système de transport, proximité des acteurs bénéficiaires, synergies possibles – plus ou moins efficaces selon les territoires –, proximité d'un centre de recherches, qualité du bassin d'emploi, contraintes écologiques et environnementales particulières. Il apparaît discutable de poser l'hypothèse que le projet a une valeur quelle que soit sa localisation : tous les territoires n'ont pas la même capacité à intégrer un projet d'envergure. Par ailleurs, à un niveau encore plus fin, de nombreuses contraintes peuvent favoriser ou au contraire contrarier le développement du projet.

Ces éléments ne doivent pas être négligés car s'ils peuvent paraître secondaires, ils peuvent aussi devenir déterminants pour le choix d'une localisation particulière. L'ESE doit pouvoir éclairer ces enjeux qui sont bien souvent incontournables dans les décisions à prendre. Un

même projet peut avoir une rentabilité sociale plus ou moins forte selon qu'il est localisé ici ou là.

Par ailleurs, les discussions au sein du groupe de travail ont pu mettre en évidence l'importance des politiques d'accompagnement. La valeur sociale d'un projet, en particulier s'il propose des ruptures technologiques ou organisationnelles, sera d'autant plus grande que les acteurs l'intégreront dans leur propre stratégie. Or bien souvent ces éléments sont loin d'aller de soi et il est important de bien mesurer les politiques publiques d'accompagnement (État, collectivités territoriales), mais aussi les stratégies des acteurs privés qui doivent être soutenues pour accélérer les changements.

L'ESE doit être en mesure de mettre en exergue les politiques d'accompagnement susceptibles de favoriser l'intégration du projet dans un système socioéconomique et dont l'absence pourrait ralentir la mise en œuvre et donc peser sur le bilan final. Ces éléments sont souvent ignorés dans les ESE car on les considère comme ne relevant pas du projet lui-même. Il n'en est rien. Bien souvent, comme le montrent les études ex post, ce sont des éléments de ce niveau qui peuvent expliquer le succès ou l'échec d'un projet.

Enfin, l'État peut considérer qu'il y va de l'intérêt du pays d'utiliser un projet de manière cohérente avec une politique plus générale d'aménagement du territoire. Il peut ainsi dans certains cas être intéressant pour la collectivité d'orienter un projet sur un territoire qui n'est pas *a priori* le meilleur, mais qui le devient dès lors qu'on voit là un moyen pour étayer des politiques de rattrapage, conforter un bassin d'emploi, accélérer les mutations du tissu économique, restaurer une compétitivité d'ensemble ou préserver des spécialités. Cela suppose dès lors de traiter dans l'ESE des considérations d'aménagement du territoire : montrer les impacts positifs qu'un projet peut avoir sur la dynamique économique et sociale d'un territoire et mesurer si ces impacts justifient à eux seuls de mettre un tel projet dans une zone qui n'aurait pas été retenue sans ces considérations.

Pour ce qui concerne l'innovation, l'ESE devrait pouvoir intégrer les enjeux stratégiques associés à l'investissement dans des projets innovants susceptibles de dégager des externalités positives (leadership, spécialisation en termes de compétences, externalités technologiques et d'apprentissage, etc.)

3. Processus d'appel à projet et d'évaluation, gouvernance, organisation et compétences mobilisées

3.1. Un contexte fortement évolutif

Le retour d'expérience sur les cinq ou dix dernières années montre le caractère très évolutif des dimensions structurantes du contexte de ces projets, qu'il s'agisse de technologies, de politiques publiques ou de géopolitique. Il s'agit donc de mettre en place un processus d'apprentissage collectif, avec des boucles de retour beaucoup plus rapides pour mieux anticiper et pour infléchir les stratégies et les cahiers des charges des appels à projet et les informations fournies aux porteurs de projet comme aux évaluateurs. Ces évaluations de projet peuvent contribuer à ce processus de retour d'expérience vers l'amont des projets de façon très utile, comme l'a montré ce premier exercice. De manière générale, l'évaluation socioéconomique et l'instruction des projets doivent être mieux articulées.

3.2. S'inspirer des meilleures pratiques

Concernant les processus d'appels à projet, leur contenu et leurs destinataires, il semble utile de s'inspirer, au travers d'analyses précises, des meilleures pratiques, en France dans d'autres domaines comme l'espace (voir Newspace et les périmètres et rôles attendus du CNES et des start-ups *versus* les grands groupes industriels) mais aussi ailleurs dans le monde, notamment aux États-Unis (DARPA/NASA et Pentagone/ARPA-E) ou en Chine (PV-Batteries).

Dès lors qu'il s'agit de conduire des grands projets comme des réacteurs nucléaires, ou de mettre en place des filières industrielles comme les batteries ou l'hydrogène, il semble utile d'avoir un commanditaire ou un maître d'ouvrage de l'ensemble qui dispose de fortes compétences scientifiques et industrielles, capable de définir les besoins et de hiérarchiser les technologies et les maillons pertinents. Selon les cas, on peut ensuite faire appel soit à des entités publiques, soit à de grands groupes capables de conduire eux-mêmes avec l'appui de compétences d'entités publiques des objets de grande taille et complexes – à la façon d'Elon Musk pour SpaceX ou de CATV pour les batteries –, ou de recourir à des start-ups innovantes pour de petits projets ou pour des parties bien spécifiques de grands projets ou de filières.

3.3. Renforcement des instances en charge des feuilles de route stratégiques

La multiplicité des documents de prospective, de stratégie ainsi que des feuilles de route issues de diverses entités publiques – DGEC, ADEME, DGE, CRE, SGPE, SGPI, HCSP, etc.¹ –, sans parler des productions de la Commission européenne, pose question. D'autant que pour le lecteur ne disposant que des publications facilement accessibles, le niveau d'analyse reste souvent peu précis sur les plans scientifiques, industriels et économiques. Cette fragmentation des instances en charge de problèmes complexes et systémiques avec de fortes dimensions scientifiques et industrielles ne contribue pas à assurer un cadre cohérent et pertinent des ESE.

3.4. Mobiliser davantage de scientifiques, industriels et économistes ayant piloté des projets stratégiques

Les compétences nécessaires tant dans l'élaboration des feuilles de route et des appels à projet que pour l'évaluation des projets eux-mêmes devraient mobiliser davantage de scientifiques, d'industriels et d'économistes ayant été dans des positions de responsabilité et de pilotage stratégique et opérationnel d'objets analogues. Les compétences scientifiques, industrielles et économiques de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies pourraient contribuer à la constitution de ce réseau d'experts.

¹ Direction générale de l'Énergie et du Climat, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Direction générale des Entreprises, Commission de régulation de l'énergie, Secrétariat général à la planification écologique, Secrétariat général pour l'investissement, Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan.



CHAPITRE 3

MESSAGES CLÉS ET PROPOSITIONS POUR LA DEUXIÈME ÉTAPE

1. Questions et recommandations

Les propositions de recommandations formulées ici renvoient aux principales caractéristiques des projets bas carbone considérés dans ce qui précède :

- Des projets scientifiques et techniques innovants et complexes dont le passage au stade industriel est délicat, et qui seront en concurrence sur des marchés souvent internationaux. Le premier enjeu étant qu'ils servent la compétitivité de long terme du pays, grâce à une énergie à coûts maîtrisés dans la durée.
- Des projets qui s'insèrent dans le développement de filières industrielles bas carbone et dans des systèmes énergétiques complexes, interdépendants et intégrés, comme le système électrique. L'utilité de ces projets au regard des finalités – décarbonation, compétitivité à long terme, sécurité d'approvisionnement et souveraineté, réindustrialisation, etc. – va donc dépendre de leur insertion dans les feuilles de route et les stratégies de ces filières industrielles et de ces systèmes énergétiques.
- La viabilité et l'intérêt pour le pays de ces projets sont liés à la qualité des stratégies et des feuilles de route comme à la cohérence des politiques publiques qui encadrent ces programmes, ainsi qu'à leur crédibilité dans la durée. Les interventions de l'État ne se réduisent donc pas à l'aide aux investissements, elles structurent également une part importante de l'environnement de ces projets. Les besoins de l'État et les raisons de son intervention face à des « échecs de marché » et, pour prendre en compte les objectifs d'intérêt général comme la décarbonation de la planète, la croissance économique et sociale du pays, sa compétitivité à long terme et sa souveraineté doivent être

correctement explicités et lisibles pour les porteurs de projet, sauf à risquer de devenir des « échecs de l'État ».

- Le contexte de ces projets innovants est particulièrement évolutif, qu'il s'agisse de technologies, de géopolitique, de besoins économiques et sociaux ou d'environnement. Il est donc important d'en tenir compte pour l'appréciation précise et lucide des risques et des opportunités des projets. Il convient en outre de mettre en place des boucles de retour sur les feuilles de route et stratégies, ainsi qu'un suivi des projets.

1.1. L'évaluation socioéconomique

L'ESE doit dresser un cadre complet du projet, au-delà des considérations générales et en s'intéressant d'abord aux conditions de sa viabilité économique. Elle doit positionner le projet en le comparant aux alternatives possibles et à ce qui se fait ailleurs en France ou à l'étranger.

Dit autrement, les premières parties de l'ESE – contexte stratégique, caractéristiques du projet et de ses alternatives, et VAN financière, auxquels il convient d'ajouter l'analyse des risques liés au projet – doivent permettre de vérifier la compétitivité à long terme du projet et d'apprécier s'il peut bénéficier d'une aide à l'investissement pour l'aider à naître. L'examen de ses conditions de réussite et de compétitivité à long terme compte tenu de la concurrence en France et à l'international devrait être réalisé dans les mêmes conditions de professionnalisme que celles définies pour le comité d'engagement d'un grand groupe industriel.

Il s'agit de porter une vision globale et de synthèse sur toutes les dimensions stratégiques du projet, quelles que soient les évaluations partielles déjà réalisées par telle ou telle entité publique. C'est bien sûr indispensable pour les projets au stade de déploiement industriel sur des marchés (batteries, usine de production d'hydrogène par électrolyse, décarbonation de l'acier) pour lesquels la VAN financière doit permettre une discussion sur les dimensions clés des coûts et des revenus et les risques associés, les optimisations économiques possibles pour améliorer les résultats tant sur le design du projet que sur ses conditions d'exploitation dans la durée. Mais ce doit être aussi une préoccupation centrale pour les projets innovants à des stades de maturité moins avancés comme l'hydrogène haute température ou les AMR nucléaires.

Cinq points pourraient être davantage développés dans cet esprit :

- Examiner les verrous scientifiques, techniques et industriels avec une analyse des TRL, notamment des composantes de TRL faibles, avec une attention particulière pour le passage de la ligne pilote à l'échelle industrielle et les risques associés ;
- Une analyse des coûts des grandes composantes de l'investissement et des alternatives possibles, y compris en termes de design ; et une analyse des coûts et des revenus (ventes

sur des marchés, subventions de formes diverses attendues), et des risques associés sur toute la durée d'exploitation. Les variables clés qui pèsent sur le résultat et qui sont retenues dans le calcul (prix de l'électricité, du gaz, des minerais, de l'hydrogène, etc., selon les projets) devraient faire l'objet de discussions plus critiques. Il apparaît indispensable ici de construire, pour toutes les variables pertinentes et pour différentes catégories de projets, une « doctrine » et des jeux d'hypothèses communes.

- Interroger les hypothèses issues des documents de la puissance publique lorsque le contexte évolue, en matière notamment de prévision de demande, de *sourcing* (utiliser des ENRi ou de l'électricité bas carbone), et le réalisme et la crédibilité ainsi que les besoins de politiques publiques de soutien concernant les OPEX à long terme.
- La présentation de la VAN financière devrait s'accompagner d'une analyse des risques et de leurs conséquences possibles sur la viabilité du projet et sur sa compétitivité, ainsi que d'une analyse approfondie des alternatives possibles.
- La présentation de la VAN-SE devrait permettre de visualiser clairement les raisons des écarts de rentabilité par rapport à la VAN financière, liées notamment à la prise en compte des valeurs tutélaires (à la place des instruments de politiques publiques, taxes ou autres, le cas échéant) comme la VAC ou le taux d'actualisation (par rapport au CMPC ou coût moyen pondéré du capital), ainsi que des éléments liés aux impacts attendus des projets particulièrement sur les territoires. Les objectifs que la puissance publique attend de ce projet et du programme dans lequel il s'insère pourraient faire l'objet de développements qualitatifs précis et argumentés pour vérifier que la VAN-SE les reflète, ou à défaut pour en tenir compte de façon qualitative dans la décision finale.

La puissance publique doit disposer à ce stade d'une analyse approfondie des risques au regard de ses objectifs pour le pays.

1.2. ESE et feuilles de route stratégiques des pouvoirs publics

Il ressort de ce travail un besoin de remettre les ESE en perspective avec des exercices prospectifs réalistes.

Le bilan critique des ESE disponibles montre que des efforts doivent être menés pour corriger la faiblesse de l'analyse des questions relatives à la demande et aux équilibres à long terme de l'offre et de la demande, ce qui pose un problème de réalisme technique, industriel et économique. Il importe aussi de prendre en compte les conditions de concurrence à l'échelle française, européenne et internationale.

Cela nécessite d'introduire de la cohérence entre les ESE et les feuilles de route stratégiques et avec les politiques publiques associées qui devraient faire elles-mêmes l'objet d'analyses

coûts-bénéfices et d'études d'impact à long terme en mobilisant des grilles d'analyse cohérentes avec celles préconisées pour les ESE des projets.

1.3. Besoin de clarification et d'approfondissement des différentes finalités d'intérêt général

Se révèle un besoin de clarification et d'approfondissement des différentes finalités d'intérêt général et de leurs articulations (et éventuels conflits) : décarbonation, souveraineté, compétitivité, industrialisation, emplois, innovation, aménagement du territoire. En lien avec cette clarification, il serait utile de mener une analyse critique rapide des modes de calcul et de l'utilisation des valeurs tutélaires associées, lorsqu'elles existent. Pour les projets examinés, c'est particulièrement le cas de la VAC, mais aussi des taux d'actualisation ou de la valeur attachée aux emplois. Ajoutons que les objectifs clés de compétitivité, de réindustrialisation du pays et de souveraineté ne sont pour le moment quasiment pas pris en compte de façon opératoire (même qualitativement).

1.4. Mise en place d'un processus d'apprentissage collectif

Enfin, il est incontournable d'assurer un retour d'expérience structuré pour mettre en place un processus d'apprentissage collectif tant pour le suivi des projets que pour bénéficier des enseignements des succès-échecs sur l'évolution des feuilles de route et stratégies. Ce qui appelle sans doute une réflexion sur le fonctionnement fragmenté de l'État et sur la mobilisation de compétences de pilotage industriel et économique.

2. Propositions pour la deuxième étape

Les quelques propositions ci-dessous constituent une base essentielle pour alimenter la suite des travaux, en donnant les points les plus urgents à traiter et en précisant la méthodologie à mettre en œuvre pour améliorer de manière significative les outils d'aide à la décision publique.

2.1. Cahier des charges du groupe de travail

Les travaux à engager devront proposer des éléments de diagnostic et formuler des recommandations sur les points suivants :

- d'abord sur le point central des méthodologies des ESE des projets dans le secteur de l'énergie qui sont portés par la puissance publique, avec une attention toute particulière pour les projets innovants ;

- ensuite sur des éléments qui conditionnent la qualité des ESE et qui résident :
 - dans les pratiques d'analyse coûts-bénéfices et études d'impact associées aux documents stratégiques, feuilles de route et appels à projets en amont des projets eux-mêmes, sachant qu'il est indispensable de pouvoir assurer une cohérence entre le niveau stratégique général et les ESE développées projet par projet ;
 - dans les procédures de retour d'expérience assurant un processus d'apprentissage collectif pour faire évoluer les stratégies, pour réviser les feuilles de route dans des domaines qui sont évolutifs et pour définir les modalités d'une gouvernance de suivi des projets.

2.2. Méthodes de travail

La méthode doit s'inspirer de celle mise en place pour ce rapport d'étape :

- partir d'exemples concrets d'ESE dans plusieurs domaines, avec des degrés de maturité et d'innovation différents, pour s'assurer de la faisabilité et de l'utilité des recommandations formulées ;
- analyser des feuilles de route, des stratégies et des appels à projets dans plusieurs domaines, ainsi que les études et les grilles d'analyse mobilisées pour évaluer l'impact et l'intérêt pour la collectivité des projets, comme des politiques publiques structurantes dans le secteur de l'énergie.
- analyser et tirer parti des meilleures pratiques à l'étranger sur ces sujets (États-Unis et Chine), de celles mises en œuvre en France dans d'autres secteurs (défense, aéronautique, spatial) comme de celles utilisées au sein des comités d'engagement dans les grands groupes industriels pour appréhender les projets de R & D, par exemple.
- une attention particulière devra être portée aux points suivants :
 - analyse de la viabilité à long terme et de la compétitivité des projets (verrous scientifiques et techniques, industriels et économiques) ;
 - prise en compte dans l'évaluation de l'analyse du contexte économique et social et de la concurrence internationale ;
 - amélioration de la lisibilité et de la cohérence des VAN financières et socio-économiques, accompagnées d'analyse des risques, y compris du point de vue des pouvoirs publics ;
 - modalités de traitement des critères d'intérêt général, qualité et pertinence des grilles d'analyse et des outils mobilisés.



ANNEXES



ANNEXE 1

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL ET PERSONNES AUDITIONNÉES

Le groupe de travail initié par le Conseil scientifique des méthodes d'évaluation des ESE a été composé de membres permanents issus notamment de l'Académie des sciences, de l'Académie des technologies, du Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan ou du SGPI :

Olivier APPERT, Académie des technologies

Luc BAUMSTARK, animateur et rapporteur, conseil scientifique ESE HCSP

Jean-Paul BOUTTES, animateur et rapporteur, conseil scientifique ESE HCSP

Patrick CRIQUI, CNRS-université de Grenoble

Sébastien CANDEL, Académie des sciences

Marc FLEURBAEY, conseil scientifique ESE HCSP

Marc FONTECAVE, Académie des sciences

Pascal GAUTIER, SGPI

Maxime GÉRARDIN, HCSP

Patrick LEDERMANN, Académie des technologies

Sacha MAIRE, secrétariat du groupe de travail

Jincheng NI, HCSP

Nicolas RIEDINGER, HCSP

Didier ROUX, Académie des sciences, Académie des technologies

Dominique VIGNON, Académie des technologies

Outre ces membres permanents, des intervenants extérieurs ont été auditionnés spécifiquement lors de certaines réunions, pour leur expertise reconnue dans les secteurs concernés.

Réunion batteries

Jean-Marie TARASCON, Académie des sciences

Réunion décarbonation

Marc FLORETTE, Académie des technologies

Réunion nucléaire

Vincent BERGER, Haut-commissaire à l'énergie atomique

Yves BRÉCHET, Académie des sciences

Philippe PRADEL, Académie des technologies

Gilles ZASK, expert Combustible et ingénierie nucléaire



ANNEXE 2

DOCUMENTS ET RÉFÉRENCES MOBILISÉS DANS LES SÉANCES DE TRAVAIL

En amont de chaque réunion, une bibliographie a été partagée avec l'ensemble des membres du groupe de travail, afin de leur permettre de s'appropriier les sujets sous trois angles :

- **des ESE en cours d'élaboration**, confidentielles à ce stade ;
- **des rapports techniques et scientifiques** ;
- **des publications institutionnelles** : feuilles de routes et stratégies nationales (extraits PPE, SNBC, SFEC) ou rapports d'audit publics.

RAPPORTS TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES

Hydrogène

Académie des technologies (2024), « *Y aura-t-il trop d'électrolyseurs en 2035 en France pour la demande prévisible ?* », Avis approuvé par l'Assemblée le 10 avril 2024.

Commission de régulation de l'énergie – CRE (2021), *Le vecteur hydrogène*, rapport du groupe de travail n° 4 du comité de prospective, co-présidé par Olivier Appert et Patrice Geoffron, rapporteur Antoine Comte-Bellot, juin.

Académie des sciences (2024), *L'hydrogène aujourd'hui et demain*, rapport du comité de prospective en énergie, dirigé par Marc Fontecave, remis au président de la République le 9 avril 2024, publié le 21 mai 2024.

Académie des technologies (2020), *Rôle de l'hydrogène dans une économie décarbonée*, 30 juin.

Batteries

Jean-Marie Tarascon (2020), « [Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?](#) », *Comptes Rendus Géoscience – Sciences de la planète*, vol. 352 (4–5), p. 401-414, Académie des sciences, décembre.

International Energy Agency – IEA (2024), [Batteries and Secure Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report](#), avril.

International Energy Agency – IEA (2024), [EV Battery Supply Chain Sustainability, Life cycle impacts and the role of recycling](#), décembre.

David Pasquier (2017), « [Batteries à circulation : état des lieux des technologies](#) », présentation, colloque Stockage d'énergies.

Décarbonation

France Stratégie (2022), [Les coûts d'abattement en France – Partie 4 : Hydrogène](#), rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, rapporteur Maxime Gérardin, mai.

International Energy Agency – IEA (2023), [Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach – 2023 Update](#), Paris, septembre.

International Energy Agency – IEA (2020), [Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking](#), Paris, octobre.

International Energy Agency – IEA (2023), [Cement – Analysis](#), Paris, septembre.

International Energy Agency – IEA (2025), [Policy Toolbox for Industrial Decarbonisation](#), Paris, mars.

Fraunhofer ISI (2024), [Direct electrification of industrial process heat: An Assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU](#), study on behalf of Agora Industry, juin.

Colombus Consulting (2022), « [Électrifier la chaleur des fours industriels pour décarboner l'industrie](#) », juin.

Roland Berger (2021), [Green steel: The race is on. What will it take to decarbonize the steel industry?](#), octobre.

Nucléaire

Académie des sciences (2022), « [Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance \(SMR\) : état des lieux et perspectives](#) », Avis du comité de prospective en énergie, 20 octobre.

Académie des technologies (2024), « [Trajectoire vers un nucléaire durable pour la France](#) », Avis approuvé le 12 juin 2024.

OCDE / NEA – Nuclear Energy Agency (2024), *The NEA Small Modular Reactor Dashboard – Second Edition*, Paris, OECD/NEA Publishing.

Jean-François Sauvage (2024), « Projets de réacteurs nucléaires pour un futur plus lointain », présentation dans le cadre de la SFEN, juin.

PUBLICATIONS INSTITUTIONNELLES : FEUILLES DE ROUTE, STRATÉGIES NATIONALES ET RAPPORTS D'AUDIT PUBLICS

Hydrogène

Ministère de la Transition écologique (2023), *Consultation sur la nouvelle stratégie française de déploiement de l'hydrogène décarboné*, 15 décembre.

Ministère de la Transition écologique et solidaire & Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance (2020), « *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. Dossier de presse* », 8 septembre 2020.

Batteries

Cour des comptes européenne (2023), *La politique industrielle de l'UE en matière de batteries : un nouvel élan stratégique est nécessaire*, Rapport spécial, 15-2023, Luxembourg.

Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (2023), « *La stratégie nationale « Batteries » : un axe clé de France 2030 sur les mobilités durables* », article publié le 30 mai 2023.

Décarbonation

ADEME (2024), *Plan de transition sectoriel de l'industrie de l'acier en France*, rapport de synthèse, coll. Expertises, avril.

ADEME (2021), *Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France*, rapport de synthèse, coll. Expertises, octobre.

France Stratégie (2024), *Les coûts d'abattement – Partie 7 : Acier*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, octobre.

Commission européenne (2025), *The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for EU competitiveness and decarbonization*, communication officielle, 26 février.

Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (2023), « [Transition écologique : une planification pour accélérer la décarbonation des sites industriels](#) », article publié le 14 décembre 2023.

Nucléaire

CEA / APNI – Agence de programme nucléaire innovant (2024), « [La sélection des start-up du nucléaire du programme France 2030](#) », présentation SFEN, 27 juin.

Bpifrance (2023), [Appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » – Cahier des charges. France 2030](#), mars 2022 – juin 2023.

Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique (2023), « [Nucléaire de demain: de nouveaux projets innovants soutenus par France 2030](#) », Dossier de presse, 27 novembre 2023.

OPECST (2023), [Le développement des réacteurs nucléaires innovants en France](#), par Olga Givernet, députée, et Stéphane Piednoir, sénateur, Assemblée nationale n° 1997 et Sénat n° 217, 14 décembre 2023.

CNE² – Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (2024), [Rapport d'évaluation n° 19](#), voir le chapitre 1 « Disponibilité de l'uranium naturel », mai.

ASNR – Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (2024), [Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2024](#).



Directeur de la publication

Clément Beaune, haut-commissaire

Directeur de la rédaction

Antonin Aviat, haut-commissaire adjoint

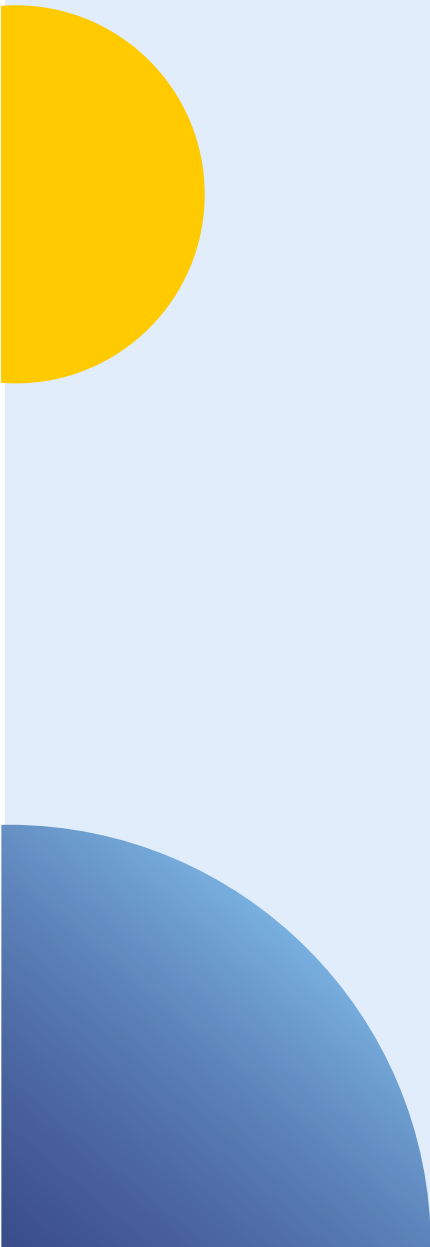
Secrétaire de rédaction

Olivier de Broca

Contact presse

Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr



Retrouvez les dernières actualités du Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan



@StrategiePlan



@StrategiePlan



Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan



francestrategie



@strategieplan



StrategieGouv

Le Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Il éclaire les choix collectifs sur les enjeux démographiques, économiques, sociaux, environnementaux, sanitaires, technologiques et culturels, dans un cadre national et européen.

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement.



**HAUT-COMMISSARIAT
À LA STRATÉGIE
ET AU PLAN**

*Liberté
Égalité
Fraternité*