
Rapport remis à la DGS le 8 novembre 2004

Champs Magnétiques d'Extrêmement Basse Fréquence et Santé

A. Aurengo, J. Clavel, R. de Seze, P. Guénel, J. Joussot-Dubien, B. Veyret

1	Introduction	3
1.1	<i>Environnement électromagnétique et effets sanitaires.....</i>	3
1.2	<i>Mission du groupe d'experts.....</i>	4
1.3	<i>Méthode</i>	5
2	Description des phénomènes physiques	7
2.1	<i>Interaction des champs EBF avec la matière vivante.....</i>	7
3	Données sur les expositions du public.....	10
3.1	<i>Les sources de champs électromagnétiques EBF</i>	10
3.2	<i>Estimation de l'exposition</i>	11
3.3	<i>Répartition de l'exposition dans la population.....</i>	15
3.4	<i>Conclusion</i>	20
4	Etudes en laboratoire	21
4.1	<i>Études cellulaires</i>	21
4.2	<i>Études animales</i>	22
4.3	<i>Études humaines.....</i>	25
5	Etudes épidémiologiques	27
5.1	<i>Champs EBF et cancer de l'enfant</i>	27
5.2	<i>Résultat des études épidémiologiques</i>	34
5.3	<i>Conclusions sur les études épidémiologiques</i>	35
6	Quantification du risque	37
6.1	<i>Peut-on évaluer une relation dose-effet ?</i>	37
6.2	<i>Exposition des enfants de moins de 15 ans.....</i>	37
6.3	<i>Nombre de leucémies imputables aux EBF chez les enfants.....</i>	38
6.4	<i>Conclusion sur l'évaluation du risque</i>	39
7	Recommandations pour la gestion du risque.....	40
7.1	<i>Évaluation de l'exposition</i>	40
7.2	<i>Connaissance de la population exposée.....</i>	41
7.3	<i>Surveillance de la population d'enfants exposés</i>	42
7.4	<i>Approches de précaution</i>	45
7.5	<i>Réglementation</i>	47
7.6	<i>Perception et communication du risque.....</i>	47
8	Recommandations pour la recherche	48
8.1	<i>Épidémiologie</i>	48
8.2	<i>Expérimentation en laboratoire</i>	49
9	Résumé du rapport	51
10	Bibliographie.....	54
11	Annexe : Composition du groupe d'experts	60

1 Introduction

1.1 Environnement électromagnétique et effets sanitaires

Nous sommes continuellement exposés à des champs électromagnétiques de toutes sortes, qu'ils soient d'origine naturelle (champ magnétique terrestre, lumière du soleil par exemple) ou créés par l'homme pour satisfaire ses besoins en termes de communication, de transport, de confort, etc.

Le nombre de sources de champs électromagnétiques dans notre environnement a prodigieusement augmenté durant les dernières décennies. Il est donc légitime de s'interroger sur les éventuels effets sur la santé que cette exposition croissante pourrait générer. Dans ce rapport, ce sont seulement les champs magnétiques utilisés dans la génération et le transport de l'électricité qui sont présentés. Il faut bien les distinguer des autres types de champs dans notre environnement. En effet, leur fréquence, qui est en Europe de 50 hertz est beaucoup plus basse que celle des ondes radio (autour de 100 millions de hertz) et celle de la lumière (autour de 100 mille milliards de hertz !). Au-delà, commence la gamme des champs électromagnétiques « ionisants » dont l'énergie est suffisante pour rompre les molécules et ioniser les atomes (UV, rayons X, par exemple). L'énergie correspondant aux champs qui nous intéressent ici et que l'on qualifie d'« extrêmement basse fréquence » (EBF, abrégé en ELF¹ en anglais), est donc très faible et les tissus biologiques ne sont pas affectés directement par ces champs.

L'objet de ce rapport est de faire le point sur les connaissances scientifiques acquises et sur les conséquences à en tirer, à la fois au plan réglementaire et en termes de communication scientifique et technique vers le public et les médias.

Quand on veut gérer le risque associé à un facteur tel que les champs magnétiques, on met en œuvre l'approche dite de « gestion du risque » qui se déroule en plusieurs étapes.

Il faut tout d'abord « évaluer le risque » c'est-à-dire l'identifier et déterminer, à partir des résultats scientifiques disponibles, ou en réalisant de nouvelles recherches, ce que l'on sait des « dangers » potentiels liés à tel facteur (par exemple le danger d'électrocution dans une installation mal isolée). Il faut également évaluer la « probabilité d'exposition » au facteur considéré. En effet, le risque correspond au danger (électrocution dans notre exemple) mais aussi aux circonstances dans lesquelles on se trouve exposé à ce danger (rares installations defectueuses, enfants mal surveillés, etc.). Dans ce rapport, une analyse du risque est faite pour les champs magnétiques EBF.

À partir de cette évaluation du risque, on peut ensuite déterminer des « limites d'exposition » que l'on doit respecter pour réduire le risque au minimum. C'est là le travail de commissions de physiciens, biologistes et médecins qui recommandent des limites, fondées sur l'« analyse du risque », qui peuvent dépendre de la fréquence des champs électromagnétiques et des catégories de personnes exposées (public, travailleurs).

La gestion du risque proprement dite peut alors être engagée : des décisions d'ordre politique sont

¹ Extremely low frequency

prises en mettant en œuvre de manière réglementaire les recommandations ou en proposant des approches de précaution pour réduire de manière individuelle et volontaire l'exposition des individus. La gestion du risque implique la communication sur la nature et l'intensité du risque, qui consiste à former les professionnels (par exemple les médecins ou les techniciens de l'électricité), et à informer le public afin que les mesures soient bien comprises et que des craintes infondées ne soient pas générées. L'objet de ce rapport n'est pas d'édicter des mesures de gestion des risques, mais seulement de suggérer des propositions en la matière.

Les premières investigations sur les effets biologiques des champs électromagnétiques EBF ont été entreprises par des chercheurs soviétiques dans les années 1960, puis reprise depuis par de nombreux groupes de recherche de par le monde. De très nombreux résultats ont été publiés et, si l'on n'a pas actuellement toutes les réponses, on sait que l'existence d'un problème majeur en santé humaine est peu probable lorsque les champs sont de faible intensité.

Il reste vrai qu'il est très difficile de démontrer de manière certaine et convaincante l'absence d'effet.

De plus, il est nécessaire de rappeler que les effets biologiques qui sont recherchés en laboratoire ne conduisent pas nécessairement à des effets sanitaires délétères. La distinction entre effet biologique et sanitaire est cruciale. Ainsi, une consommation de vin en faible quantité peut être bénéfique tandis qu'une consommation excessive est très nocive, mais, dans les deux cas, les effets biologiques sont différents.

Deux types d'investigations ont été mis en œuvre pour déterminer l'existence d'effets biologiques des champs magnétiques EBF et leurs conséquences sanitaires. Il s'agit d'une part des études épidémiologiques dans lesquelles on recherche une éventuelle relation entre un facteur (ici le champ magnétique environnant) et une maladie (le cancer par exemple), et, d'autre part, des études expérimentales qui sont pratiquées en laboratoire sur l'homme, l'animal et la cellule en culture.

1.2 Mission du groupe d'experts

Dans sa lettre de mission aux experts, datée du 28 septembre 2001, le Professeur Abenham, Directeur Général de la Santé, précisait :

« La Direction générale de la santé a pris connaissance du rapport relatif aux liens éventuels entre l'exposition aux champs électromagnétiques de très basse fréquence et les risques de cancers, publié en mars 2001 par un groupe d'experts britanniques présidé par Sir Richard Doll. Plus récemment le Centre international de recherche contre le cancer (CIRC) a classé en catégorie 2B les champs magnétiques domestiques de très basse fréquence et en catégorie 3 les champs électriques et les champs magnétiques statiques. Une monographie détaillant l'état des connaissances scientifiques est en cours de publication par le CIRC.

Ces deux évaluations fondées sur des études épidémiologiques publiées au cours des dix dernières années sont parfaitement convergentes et évoquent la possibilité d'une augmentation du risque de leucémie chez l'enfant lors d'expositions résidentielles à un champ magnétique supérieur à 0,4 µT, sous la

réserve de l'existence éventuelle de biais de sélection évoquée par les deux groupes d'experts.

Je souhaite réunir un groupe d'experts afin de :

- Préciser les conséquences éventuelles que l'on doit tirer de ce rapport britannique et du classement du CIRC, notamment au regard d'éventuelles propositions d'évolution des recommandations internationales actuelles et des réglementations nationales.*
- Quantifier le risque pour la population.*
- Faire des recommandations en matière de surveillance et de programmes de recherche.*
- Proposer des outils de communication en direction du public. »*

Plus tard, le groupe d'experts a été rattaché au Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (section radioprotection puis milieux de vie).¹

Le présent rapport est à rapprocher de celui de la Commission d'Orientation du Plan National Santé-Environnement qui vient d'être publié² et qui traite, entre autres, des champs électromagnétiques non-ionisants, EBF et RF.

1.3 Méthode

Le groupe d'experts s'est réuni de nombreuses fois durant près de trois ans. La méthode de travail employée a été celle qui est admise dans le cadre de l'expertise scientifique :

- l'analyse des documents était collective ainsi que la définition des recommandations et conclusions,
- des consultations ont eu lieu avec les acteurs principaux que sont le CSTB³, EDF et RTE⁴,
- le document a été rédigé essentiellement à partir des rapports récents et des articles publiés dans des revues à comité de lecture.

Les documents fondamentaux de références sont les rapports suivants :

- Rapport du NIEHS⁵ Programme RAPID (1999).
- NRPB (2001)⁶ et (2004).⁷
- Monographie n° 80 du CIRC/IARC (2002)
- Neutra, RR, DelPizzo, V, Lee, GL (2002)¹

¹ Arrêté du 18 janvier 2002 (NOR : MESP0220382A)

² <http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/pnse/>

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

⁴ Réseau de Transport de l'Electricité

⁵ National Institute of Environmental Health Sciences, USA

⁶ Doll, 2001

⁷ www.nrpб.org

-
- Rapports du « Health Council of the Netherlands » (2003 et 2004).
 - Livre bleu de l'ICNIRP² (2004)

De brefs rappels figurent dans ce rapport concernant les connaissances sur les mécanismes et les effets biologiques. Seuls y figurent les résultats récents publiés qui permettent de suivre l'évolution des connaissances.

Compte tenu de la mission confiée au groupe par la DGS et des données scientifiques disponibles dans ces rapports, le groupe d'experts a traité essentiellement la problématique des champs magnétiques EBF et de la leucémie de l'enfant.

¹ www.dhs.ca.gov/ehib/emf/RiskEvaluation/riskeval.html

² International Commission on Non Ionizing Radiation Protection

2 Description des phénomènes physiques

Une étude approfondie des phénomènes physiques impliqués dans les interactions des champs électriques et magnétiques EBF est décrite dans le « livre bleu » de l'ICNIRP cité plus haut. Seuls quelques rappels sont donnés ci-dessous.

2.1 Interaction des champs EBF avec la matière vivante

On rappellera brièvement les définitions des champs électriques et magnétiques.

À partir de la force exercée sur une particule de charge électrique q qui est soumise à la force

$F = q(E + V^B)$ où F est exprimée en newtons, E est le champ électrique en volts par mètre, V la vitesse de la particule en mètres par seconde et B , l'induction de champ magnétique, en teslas.

Les propriétés électriques de la matière sont définies par la permittivité relative ϵ_r et la conductivité σ . La permittivité est liée à la polarisation P de la matière sous l'effet du champ électrique E suivant la relation $P = \epsilon_0 E (\epsilon_r - 1)$ où ϵ_0 est la permittivité du vide. La conductivité est liée à la densité de courant j exprimée en ampères par mètres carrés par la relation $j = \sigma E$, quand seules les charges interviennent dans la conduction, ce qui est le cas dans la gamme de fréquence des EBF.

Les propriétés diélectriques des différents tissus qui composent la matière vivante dépendent essentiellement de leur teneur en eau. Le tableau ci-dessous donne les valeurs principales à 50 Hz.¹

Tissu	Conductivité σ (S/m)	Permittivité ϵ
Sang	0,7	5300
Muscle	0,23	$1,8 \times 10^7$
Matière grise	0,075	$1,2 \times 10^7$
Os	0,02	8800
Graisse	0,02	$1,5 \times 10^7$
Peau sèche	0,0002	1100

Propriétés diélectriques des tissus à 50 Hz

On constate que la conductivité augmente avec la teneur en eau des tissus et que la permittivité est élevée pour les principaux tissus dans la gamme de fréquence des EBF.

L'induction de flux magnétique B est donnée par $B = \mu_0 H (\mu_r - 1)$ où H est le champ magnétique en ampères par mètre et μ_r la perméabilité magnétique. La matière vivante n'est pas magnétique : les seules structures magnétiques présentes dans certains tissus sont les particules de magnétite décrites plus loin. Ainsi, dans l'organisme, $B = \mu_0 H$, et le champ magnétique, contrairement au champ électrique, n'est pas atténué.

¹ d'après C. Gabriel (<http://niremif.ifac.cnr.it/tissprop/#over>)

2.1.1 Induction de courants

Le champ électrique à l'intérieur de l'organisme est atténué par rapport au champ externe d'un facteur 10^8 à 50 Hz. Les courants induits dans les tissus par les champs externes sont donc négligeables. Ce n'est pas le cas pour le champ magnétique externe car les variations périodiques du champ magnétique à l'extérieur du corps induisent à l'intérieur de celui-ci un champ électrique qui lui est proportionnel $E = - dB/dt$. La densité de courant qui en résulte $j = \sigma E$ est proportionnelle à B_0 , ω et R , où B_0 est l'amplitude du champ sinusoïdal ($B = B_0 \sin \omega t$), ω la pulsation ($\omega = 2\pi f$) où f est la fréquence, et R le rayon de la boucle de courant au sein de l'organisme. Ainsi, dans un champ de 1 µT à 50 Hz, une densité de courant de $6,5 \mu\text{A}/\text{m}^2$ est induite dans un circuit de 20 cm de diamètre à l'intérieur du corps.

Les courants induits, qui s'ajoutent à ceux qui sont produits *in situ* par l'organisme, ont des effets qui sont maintenant bien connus (cf. revue de Reilly)¹. Les limites d'exposition ont été déterminées à partir de ces effets avec un facteur d'incertitude.

2.1.2 Autres mécanismes

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer d'éventuels effets biologiques liés aux courants et champs électriques sur la base d'autres mécanismes d'interaction que ceux décrits ci-dessus (cf. revue de Valberg et al.)². Ainsi, la présence de cristaux de magnétite dans l'organisme est bien documentée : il s'agit de cristaux magnétiques présents en quantité faible dans certains tissus (cerveau, lymphocytes, etc.) mais sans qu'aucune preuve d'effets des champs magnétiques sur ces structures magnétiques ne soit apportée.

De même, l'hypothèse séduisante d'une action des champs sur la cinétique de recombinaison des paires de radicaux libres n'a pas trouvé de confirmation expérimentale dans un organisme vivant soumis à des champs magnétiques faibles.

En ce qui concerne la leucémie, l'hypothèse des courants de contacts passant à travers la moelle osseuse a été faite par Kavet et coll³.

2.1.3 Conclusion sur les mécanismes

À ce jour, il n'existe donc pas de mécanismes établis, responsables d'effets biologiques en dessous de 5 mT, mais il est utile de résumer la situation actuelle en termes de connaissances scientifiques et de limites d'exposition. Ainsi, dans le tableau ci-dessous, les valeurs les plus représentatives sont citées. Les valeurs en gras correspondent à la grandeur physique utilisée dans la détermination du seuil. La relation entre champ électrique interne, densité de courant et champ magnétique externe est celle qui permet de passer de la restriction de base (densité de courant en mA/m^2) au niveau de référence (champ magnétique en teslas) :

¹ Reilly, 1998

² Valberg et al. 1997

³ Kavet et al. 2004

1- Les études des groupes de Durand aux USA et Jefferys en Angleterre¹ ont indépendamment mis en évidence des effets de champs électriques sur les neurones dans des coupes de cerveau de rats. Le seuil se trouve à environ 1 V/m dans le tissu (correspondant à un champ magnétique extérieur de 50 mT à 50 Hz pour produire ce champ électrique au niveau des tissus).

2- Les magnétophosphènes découverts par d'Arsonval en France il y a un siècle correspondent à des sensations lumineuses produites par des champs magnétiques EBF au niveau de l'œil. Le seuil est de 10 mT à 20 Hz et un peu supérieur à 50 Hz. Il est possible que des phénomènes similaires se produisent dans d'autres parties de la tête sans que des sensations soient perçues.

3- Selon l'ICNIRP, l'effet critique est l'effet sanitaire observé au niveau de champ le plus faible. Actuellement, l'effet aigu critique est celui de la stimulation des nerfs et des muscles, et la valeur de la densité de courant à 50 Hz pour le provoquer est de 100 mA/m² correspondant à un champ magnétique extérieur de 5 mT.

4- La restriction de base de l'ICNIRP est de 2 mA/m² pour le public soit 50 fois plus faible que la valeur correspondant à l'effet critique.

5- Selon le physicien Robert Adair², la limite absolue des effets biologiques des champs magnétiques EBF se situe à 50 µT pour des organes non spécialisés.

6- L'association entre niveau de champ et leucémie chez l'enfant a un seuil déterminé par les métastudées épidémiologiques de 0,4 µT environ, cette valeur étant moyennée sur 24 ou 48 heures. Elle n'est pas comparable aux valeurs citées plus haut qui sont des valeurs instantanées.

Il n'existe donc pas de mécanisme établi pour des effets sanitaires se produisant au niveau de champs magnétiques au-dessous du microtesla.

	Base scientifique	Champ électrique interne (mV m ⁻¹)	Densité de courant interne (mA m ⁻²)	Champ magnétique externe (µT)
1	Coupe de cerveau de rat (Durand/Jefferys)	1000		50 000
2	Magnéto-phosphènes chez l'homme			10 000 à 20 Hz
3	Effet critique (ICNIRP)	100	100	5 000
4	Restriction de base ICNIRP		2	100
5	Limite physique selon R. Adair			50
6	Épidémiologie			0,4 <i>moyenne dans le temps</i>

¹ Durand, Jefferys et al. (2003)

² Adair et al. (2003)

3 Données sur les expositions du public

Une analyse précise des méthodes utilisées pour estimer les éventuels effets des champs électromagnétiques sur la santé est nécessaire pour plusieurs raisons :

- elle éclaire la validité des différentes études épidémiologiques conduites sur ce sujet et la difficulté méthodologique des méta-analyses ;
- elle permet d'évaluer la pertinence des études destinées à estimer l'importance de l'exposition aux champs électromagnétiques dans la population française, connaissance indispensable dans une optique de santé publique.

Comme pour toute estimation de l'impact sanitaire d'un facteur environnemental, il est nécessaire de disposer de données biologiques, animales ou épidémiologiques prenant en compte les paramètres pertinents de l'exposition réelle des sujets. L'exposition réelle étant difficilement accessible, pour les raisons que nous verrons, de nombreuses études épidémiologiques ont recours à des indicateurs de l'exposition dont la validité doit être questionnée.

Nous analysons successivement les sources d'exposition, la mesure directe de l'exposition, la recherche de ses déterminants, et les méthodes indirectes proposées. Nous envisagerons ensuite les enquêtes destinées à estimer l'exposition de l'ensemble de la population.

Les champs électriques sont atténus par les parois des habitations et par la peau. Ils ont été peu étudiés. La quasi totalité des études les concernant sont négatives¹. Nous limiterons notre propos aux champs magnétiques de très basse fréquence (50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord).

3.1 Les sources de champs électromagnétiques EBF

Dans une perspective de décision en santé publique, on peut distinguer des sources liées à des équipements collectifs (lignes électriques, trains, métros, tramways, alimentation des immeubles collectifs, éclairage public) et celles relevant d'équipements privés (câblage et éclairage intérieur des habitations, appareils domestiques, couvertures chauffantes).

Dans tous les cas, ces sources ont pour caractéristiques principales l'intensité du champ électromagnétique et sa variabilité dans le temps et dans l'espace, ainsi que leur importance relative dans l'exposition des personnes.

Le champ magnétique généré par les lignes de transport (Haute Tension) et les lignes de distribution (Moyenne Tension) est proportionnel au courant qui subit de fortes variations quotidiennes et saisonnières. En général, le courant transporté par les lignes croît avec la tension. Le champ décroît avec la distance comme le montre le tableau ci dessous :

¹ McBride et al., 1999; Dokerty et al., 1999

Tension (kV)	0 m	30 m	100 m
400	30 µT	12 µT	1 µT
225	20 µT	3 µT	0,3 µT
90	10 µT	1 µT	0,1 µT

Le champ créé par les lignes enterrées est plus intense au niveau de la ligne, mais décroît plus rapidement avec la distance. Selon les pays, la configuration différente de lignes de transport de l'électricité peut conduire à des champs magnétiques sensiblement différents pour un même courant.¹

À une distance de l'ordre de 50 à 100 mètres, le champ magnétique créé par les lignes à haute tension sont proches du bruit de fond, ce qui explique que l'exposition due aux lignes ne concerne qu'une très faible fraction de la population.

Les niveaux de champ magnétique les plus élevés dans les habitations sont générés par les transformateurs, le réseau terminal de distribution, dans les rues et les immeubles, les réseaux en façade d'immeubles, l'alimentation de l'éclairage public, etc.

En général les champs liés au réseau domestique sont peu élevés (de l'ordre de 0,2 µT) car les conducteurs sont très proches l'un de l'autre et le champ magnétique diminue en $1/R^2$ (où R est la distance du conducteur au point de mesure du champ).

Toutefois, les variations peuvent être plus sensibles selon le type de câblage. Le câblage, différent selon les pays, entraîne un champ moyen plus élevé au Royaume Uni qu'en France ou en Allemagne.

Le champ magnétique lié aux appareils électroménagers peut être élevé mais seulement à très courte distance car le flux diminue en $1/R^3$ (à 1 m il est généralement inférieur à 0,1 µT). L'exposition est donc très variable entre une couverture chauffante (3,5 µT), une perceuse électrique (3 µT à 30 cm) ou un téléviseur (0,1 µT à 1 m).

Les champs présents dans les trains (trains de banlieue, TGV) sont en général inférieurs à 10 µT mais peuvent dans quelques cas exceptionnels atteindre 100 µT.

L'environnement extérieur n'est pas nécessairement une zone de plus faible exposition, au moins en milieu urbain, en raison du passage de lignes souterraines. Des champs supérieurs à 0,2 µT sont retrouvés dans environ 50 % des rues de Göteborg examinées (étude suédoise de Lindgren²) et dans 30% des rues de villes d'Extramadure (étude espagnole de Paniaga).

3.2 Estimation de l'exposition

Les premières études épidémiologiques ont reposé sur des estimations indirectes de l'exposition, fondées sur un codage, puis sur des calculs. Ensuite sont apparues des études pour lesquelles l'exposition a été quantifiée par des mesures réelles effectuées à poste fixe, dans les lieux d'habitation

¹ Maddock et al, 1992

² Lindgren et al, 2001

(ex : chambre des enfants) ou sur les lieux de travail. Ces mesures fournissent l'exposition potentielle en un lieu donné, à partir de laquelle on estime l'exposition des personnes concernées en se fondant sur des hypothèses de durée de séjour en tel ou tel lieu. Plus récemment, des mesures directes de l'exposition des personnes au moyen d'enregistreurs portables ont été utilisées, ces mesures portant sur des durées variables (de quelques heures à une semaine). Nous présentons ces différentes techniques d'estimation de l'exposition, puis comment elles sont prises en compte dans les méta-analyses.

Il est important de noter que la métrologie de l'exposition reste un maillon faible des études épidémiologiques. Cette faiblesse peut être « temporelle » et/ou « spatiale » :

- temporelle car la plupart des études font l'hypothèse que l'exposition estimée, calculée ou mesurée au moment de l'étude est un bon reflet de l'exposition passée,
- spatiale, si les mesures faites dans un nombre réduit de lieux de vie (par exemple dans la chambre d'un enfant ou à son école) sont censées être représentatives de l'exposition moyenne des sujets.

3.2.1 Estimation de l'exposition fondée sur un code de câblage

Code de câblage de Wertheimer et Leeper¹

Il permet de classer un logement en fonction de sa distance à un type particulier de source de transport de courant. Ce codage a été simplifié par Kaune et Savitz². Cette approche ne considère que l'exposition aux champs magnétiques générés par le système de distribution « visible » de l'électricité. D'autres paramètres comme les courants de réseau et de sol, le câblage de l'habitation, ou l'ensemble des appareils domestiques ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi les « wire codes » ne peuvent être que des indicateurs grossiers des champs magnétiques à l'intérieur d'une habitation proche.³

3.2.2 Estimation de l'exposition fondée sur le calcul

Calcul théorique du champ magnétique effectué en utilisant les caractéristiques des lignes électriques (intensité du courant, distance entre les conducteurs...).

Vistnes⁴ a ainsi calculé l'intensité des champs magnétiques auxquels des enfants étaient soumis. La corrélation entre les expositions calculées et mesurées est assez bonne mais les expositions calculées ne prennent pas en considération le temps de présence des enfants à la maison. Une approche analogue a été utilisée par Feychting et Ahlbom⁵ ou par London et coll.⁶, pour prédire l'exposition aux champs magnétiques dans les résidences inaccessibles aux mesures.

Estimation fondée sur le calcul du champ magnétique produit par une ligne électrique en utilisant l'historique de sa charge.

Cette méthode a été employée dans une étude canadienne⁷ pour estimer l'exposition durant les deux années précédant le diagnostic de leucémie lorsque l'enfant (cas ou témoin) avait changé d'habitation

¹ Wertheimer et Leeper, 1979

² Kaune & Savitz, 1994

³ Wartenberg, 2001a&b

⁴ Vistnes et al, 1997

⁵ Feychting & Ahlbom, 1993

⁶ London et al, 1991

⁷ McBride et al, 1999

pendant cette période.

Dans l'étude suédoise¹, pour chaque sujet vivant à proximité d'une installation électrique haute tension, les champs magnétiques ont été calculés à partir d'informations sur la configuration de l'installation, la distance entre le logement et l'installation et le courant moyen annuel. L'exposition cumulée sur la vie du sujet est estimée en multipliant le nombre de mois d'exposition par le niveau moyen du champ magnétique dans la résidence.

Il est important de noter que ce type d'estimation indirecte est incontournable pour évaluer l'historique de l'exposition. Si dans certaines études, l'exposition contemporaine en un lieu donné est censée refléter l'exposition passée en tout lieu, ces estimations indirectes sont très souvent affinées au moyen de questionnaires, pour limiter les incertitudes temporelles ou spatiales.

Certaines études précisent l'exposition passée au moyen de questionnaires remplis par les sujets (ou leurs parents si ce sont des enfants) et portant sur les sources de champ avec lesquelles ils savent avoir été en contact². Les sujets des études doivent également fournir l'adresse de leurs précédents logements ainsi que leur durée d'occupation³.

Dans certaines études, les sujets doivent tenir un registre de leurs activités durant l'étude pour estimer un « budget espace-temps »⁴.

3.2.3 Estimation de l'exposition fondée sur des mesures en des lieux donnés

Pour mesurer l'exposition ambiante, on dispose soit de mesures ponctuelles dans le temps, instantanées ou de très courte durée (inférieure à 30 s), soit des mesures en continu (24 à 48 heures) du champ magnétique, en des points fixes, la plupart du temps réalisées dans la chambre du sujet⁵. Les mesures ponctuelles peuvent avoir pour but d'identifier les sources de champ élevé, par exemple dans la chambre d'un enfant⁶. Les mesures en continu produisent des données plus représentatives de l'exposition car les sujets passent une proportion importante de leur temps dans leur chambre.

En effet, dans une étude portant sur un échantillon de 60 jeunes de moins de 15 ans,⁷ leur journal d'activité a révélé que les enfants passaient les 2/3 de leur temps à la maison et 10 h par jour en moyenne dans leur chambre. Il y a une bonne corrélation entre la mesure fixe faite dans la chambre et la dose totale enregistrée avec les magnétomètres portatifs individuels.

Eskelinan⁸ affirme que les mesures réalisées dans la chambre sont de bons indicateurs de l'exposition personnelle. Dans son étude, la moyenne des valeurs des champs magnétiques mesurés dans l'ensemble de l'habitation est le paramètre qui synthétise le mieux l'ensemble des mesures fixes. Le coefficient de corrélation de Spearman entre les mesures dans la chambre et la moyenne pondérée est de 0,61 (IC 95 % 0,29 – 0,81) et la sensibilité et la spécificité de ces mesures fixes pour un classement entre exposés et non exposés avec un seuil à 0,29 µT, sont respectivement de 0,73 et 0,75. En utilisant la

¹ Feychting & Ahlbom, 1993

² UK CCS, 1999; Schoenfeld et al, 1999; Schuez et al, 2000; Mc Curdy et al, 2001

³ Feyching et al, 1995; UK CCS, 1999

⁴ Friedmann et al, 1996; Vistnes et al, 1997; Mc Curdy et al, 2001

⁵ Schoenfeld et al, 1999, Dockerty et al, 1999, London et al, 1991, McCurdy et al, 2001

⁶ Schüz et al, 2000

⁷ Friedmann et al, 1996

⁸ Eskelinan et al, 2002

moyenne dans la résidence, le coefficient de corrélation est de 0,77 (IC 0,55 – 0,89) et les sensibilités et spécificités sont inchangées.

Ces résultats sont confirmés par l'étude coréenne de Huyn¹ qui montre une excellente corrélation ($r = 0,91$ à $0,95$) entre l'exposition moyenne mesurée chez les enfants pendant 24 h à l'aide d'un magnétomètre portatif et les mesures faites dans leur maison où ils passent en moyenne 57 % de leur temps. Les enfants passent en moyenne 23 % de leur temps à l'école et 8 % dans d'autres institutions éducatives où les champs peuvent varier de manière significative ($M.$ géométrique = $0,21 \pm 0,18 \mu\text{T}$).

L'étude norvégienne de Vistnes² concernant l'influence de la proximité d'une ligne haute tension sur l'exposition montre la nécessité de s'intéresser également à l'exposition à l'école. C'est ainsi qu'ont procédé les auteurs de l'étude UK CCS³ qui elle aussi a validé l'utilisation de mesures ponctuelles pour estimer l'exposition.

Cependant, l'étude allemande de Schüz⁴ montre que si la moyenne de mesures ponctuelles (chambre des enfants, salle de séjour) et celle des mesures réalisées en déambulant dans la résidence sont bien corrélées ($r > 0,7$), en revanche, pour les valeurs moyennes supérieures à $0,2 \mu\text{T}$, seule une faible corrélation est trouvée. Kaune⁵ préconise l'utilisation des mesures effectuées sur une semaine, car elles sont plus stables et représentatives du champ magnétique que les mesures ponctuelles sur 24 heures.

3.2.4 Estimation de l'exposition fondée sur des mesures personnelles

Les magnétomètres portatifs permettent de mesurer l'exposition personnelle.⁶ Ils prennent en compte les champs magnétiques produits par toutes les sources potentielles sans les distinguer. La durée des mesures est généralement de 24 heures⁷ ou de 48 heures.⁸

McBride indique que la mesure d'exposition personnelle est le meilleur indicateur de l'exposition si la mesure est réalisée au moment du diagnostic de la maladie.⁹ Ce type de mesures est moins pertinent pour estimer l'exposition passée.

Certains magnétomètres n'enregistrent que l'exposition moyenne pondérée (TWA)¹⁰, d'autres qualifient l'exposition dans une gamme d'amplitude spécifiée. Ainsi, le magnétomètre EMDEX 3D ne fournit que la moyenne pondérée dans le temps, mais pas les pics d'exposition.¹¹ Le TWA est calculé en divisant l'intensité cumulée d'exposition en $\mu\text{T} \text{ h}$ par la durée de port de l'appareil.

3.2.5 Paramètres pertinents de l'exposition

Dans l'hypothèse d'un effet des champs magnétiques de très basse fréquence sur la santé, on ignore quel serait le paramètre pertinent de l'exposition lié à cet effet. Plusieurs paramètres ont été utilisés.

¹ Huyn et al, 2004

² Vistnes et al, 1997

³ UK CCS, 1999

⁴ Schüz et al, 2000

⁵ Kaune, 1993

⁶ Schoenfeld et al, 1999; Eskelinen et al, 2002; McBride et al, 1999; Vistnes et al, 1997; McCurdy et al, 2001

⁷ Schoenfeld et al, 1999; Eskelinen et al, 2002; Vistnes et al, 1997

⁸ McBride et al, 1999

⁹ McBride et al, 1999

¹⁰ Time Weighted Average

¹¹ McCurdy et al, 2001

L'exposition moyenne pondérée (TWA) est la moyenne pondérée des mesures d'exposition sur une période qui prend en compte l'intervalle de temps entre deux mesures. Cette méthode est fréquemment employée.¹ On utilise la moyenne arithmétique, géométrique ou la médiane² de ces valeurs. Vistnes et collaborateurs³ présentent les moyennes arithmétiques et géométriques des valeurs de champs car ils ne peuvent déterminer laquelle reflète le mieux un effet biologique possible.

De nombreuses études prennent en compte le temps d'exposition au dessus d'un niveau fixé ou la durée à l'intérieur d'un intervalle donné des valeurs de l'exposition, mesurés sur des points fixes. L'inconvénient de ce type de mesures est qu'elles ne prennent pas en compte l'exposition personnelle.⁴

Feychting⁵ utilise comme donnée de base de l'exposition le champ magnétique moyen généré par les installations haute tension auquel l'enfant a été exposé. L'exposition cumulée est calculée en multipliant le nombre de mois d'exposition par le niveau moyen d'exposition au sein de la résidence.

McBride⁶ et collaborateurs ont estimé l'exposition des enfants deux ans avant le diagnostic de la maladie. L'étude UK CCS⁷ s'est intéressée à l'exposition dans l'année précédant le diagnostic.

Le choix du ou des paramètres supposés pertinents est influencé par les possibilités techniques et financières des études qui conditionnent la durée et la nature des mesures, les caractéristiques des champs effectivement mesurées (résultante ou composantes x, y et z de la densité de flux magnétique ou une seule des composantes) ou la fiabilité de l'enquête d'exposition rétrospective.

Plusieurs chercheurs estiment que la mesure des pics d'exposition, la durée d'exposition au-delà d'un certain niveau de champ, les variations rapides de flux magnétique, sont peut-être plus importantes que l'estimation la plus usitée à savoir la moyenne pondérée dans le temps (TWA). Le ou les paramètres pertinents restent donc inconnus à ce jour.⁸

3.3 Répartition de l'exposition dans la population

L'étude de la répartition de l'exposition dans la population a pour objectif d'estimer quelle proportion de la population est exposée à telle ou telle valeur d'un paramètre donné de champ électromagnétique, et quelle est l'origine de cette exposition ("bruit de fond", transport du courant électrique, câblage de l'habitation, appareils électriques personnels ou collectifs, moyens de transport, exposition professionnelle ou à l'école).

Un certain nombre d'expertises collectives récentes ont montré l'intérêt de concentrer les études sur les cas d'exposition aux champs magnétiques EBF supérieure à 0,3-0,4 µT en valeur moyenne. L'estimation de la population concernée constitue donc un des éléments importants d'appréciation et de gestion du risque sanitaire potentiel. Cette estimation devrait être à la fois quantitative (effectif exposé, répartition en âge) et qualitative (caractéristiques des expositions élevées : type de logement et de câblage domestique,

¹ Preston-Martin et al, 1996

² London et al, 1991

³ Vistnes et al, 1997

⁴ Eskelinien et al, 2002

⁵ Feychting & Ahlbom, 1993

⁶ McBride et al, 1999

⁷ UK CCS, 1999

⁸ Friedmann et al, 1996

proximité d'ouvrages électriques, mode de vie, présence de tel ou tel appareil électrique ou d'éclairage).

Les champs magnétiques générés par le câblage des habitations sont plus élevés en Amérique du Nord où la tension est de 110 V qu'en Europe où elle est de 220 V, ce qui, pour une consommation d'énergie électrique et un câblage identiques, implique une intensité du courant et une intensité des champs magnétiques double en Amérique. Dans les études nord-américaines, la prévalence de champs supérieurs à 0,2 µT varie entre 10,1% et 11,8% des habitations alors que dans l'étude allemande¹ elle est de 1,4 % et dans l'étude britannique de 2,3%.

Il existe dans les habitations, à distance des appareils électriques et des cables de transport du courant, un « bruit de fond » variable selon les pays, l'heure de la journée et le jour de l'année, ce qui reflète les variations de consommation électrique. En revanche ce bruit de fond varie peu d'une pièce à l'autre d'une habitation, à condition de se tenir à distance des dispositifs électriques. L'étude de Swanson (Swanson, 1999) rapporte un niveau de fond moyen de l'ordre de 56 nT aux USA, 39 nT au Royaume Uni, 107 nT au Canada et 15 nT en Norvège. Aucune donnée n'est disponible en France.

3.3.1 Méthodes d'estimation de l'exposition dans la population

Deux approches sont possibles :

- soit la mesure directe de l'exposition individuelle réelle, par des enregistreurs individuels portables. Cette mesure directe impose des contraintes organisationnelles et une forte implication des sujets d'étude pour porter en permanence le dosimètre et remplir un questionnaire de suivi d'activité (pour analyser les enregistrements effectués et garantir leur qualité). Ceci est facile à faire sur quelques heures pour un adulte volontaire, mais beaucoup moins pour un enfant.
- soit une estimation de cette exposition réelle par la mesure de l'exposition dans les lieux de vie de la population étudiée. Ces mesures résidentielles peuvent être réalisées sans le concours actif des résidents et être confiées à des professionnels.

Les deux principales études européennes sur l'exposition résidentielle aux champs magnétiques 50 Hz ont été conduites au Royaume-Uni et en Allemagne, respectivement sur 6670 et 1835 résidences. Ces deux études donnent une estimation des populations exposées, dans leur habitation, à des champs dépassant une moyenne ou une médiane de 0,2 µT (2,3 % au Royaume-Uni et 1,4 % en Allemagne) ou 0,4 µT (respectivement 0,4 et 0,2µT).

En France, une étude a été conduite sur 153 résidences de Côte d'Or situées à proximité de lignes et des valeurs à 0,4 µT ont été retrouvées dans 0,6% des cas.

Les trois études européennes ne sont pas facilement comparables car le choix des habitations a été fait de manière aléatoire dans les études britannique et allemande (conduites dans le cadre d'une étude épidémiologique) et pour évaluer l'exposition dans des habitations proches de lignes électriques en France. De plus la notion de « proximité » des lignes n'est pas identique dans les trois pays : très restrictive en Allemagne (50 m) moins en France (300 m en 400 kV et 200 m en 225 kV) et peu au Royaume Uni² (400 m).

¹ Schüz et al, 2000

² UK CCS, 1999

3.3.2 Estimations produites au Royaume Uni

Dans le cadre de l'étude UK CCS¹, l'exposition résidentielle a été mesurée dans 6770 résidences du Royaume Uni. La proximité d'ouvrages électriques concernait :

- 257 habitats (3,7 %) situés à moins de 400 m d'une ligne 400, 275 ou 132 kV ;
- 144 habitats (2,1 %) situés à moins de 20 m d'un câble souterrain ou d'un poste ;

Sur l'ensemble des habitations examinées, les résultats suivants ont été obtenus :

- la moyenne de l'exposition dépasse 0,2 µT pour 2,3 % des habitations;
- la moyenne de l'exposition dépasse 0,4 µT pour 0,4 % des habitations;
- parmi les résidences exposées à plus de 0,4 µT, le voisinage de lignes électriques est observé dans 20 % des cas.

3.3.3 Estimations produites en Allemagne

L'étude de Schüz² a permis de quantifier les expositions dans les habitats allemands. Cette étude a été conduite dans le lieu de résidence d'enfants atteints de leucémie et de témoins. Elle comportait deux mesures sur 24 h, dans la chambre des enfants et la salle de séjour et une mesure moyenne obtenue en déambulant très lentement dans l'habitation. Les auteurs se sont intéressés aux valeurs médianes des champs mesurées sur 24 h dans la chambre de 1835 enfants. Ils ont obtenu les résultats suivants pour les 1314 témoins :

- pour 93,1 % des témoins la médiane de l'exposition est inférieure à 0,1 µT (n = 1223);
- des médianes supérieures à 0,2 µT sont mesurées chez 1,4 % des témoins (n = 20) ;
- des médianes supérieures à 0,4 µT sont mesurées chez 0,2 % des témoins (n = 3) ;
- pour les habitats où la médiane dépasse 0,2 µT, la proximité de lignes est retrouvée dans 28% des cas.

Dans les autres cas il s'agit du voisinage de câbles souterrains (14 %), du réseau de distribution et de l'éclairage public (32 %) et dans 25 % des cas la cause n'a pu être retrouvée.

- l'influence des lignes à haute tension (123 – 420 kV) est plus faible que prévu, la médiane de l'exposition ne dépassant 0,2 µT que dans 8 des 25 habitations (32 %) se trouvant à moins de 50 m de telles lignes ;
- dans les appartements les valeurs sont plus élevées que pour les résidences individuelles ;
- la médiane de l'exposition est liée à la densité de circulation routière et inversement liée au revenu moyen de la famille.

¹ UK CCS, 1999

² Schüz et al, 2000

3.3.4 Estimations produites en Italie

En 1992 est paru en Italie un décret qui imposait une distance minimum entre les lignes HT et les résidences. De façon à prévoir les mesures d'application de ce décret, un recensement des lignes a été réalisé prenant en compte les lignes de la société nationale d'électricité (ENEL) et celles des chemins de fer italiens (FS). A partir de ces données, une estimation du niveau des champs magnétiques a été possible dans les résidences. Les résultats ont été validés à l'aide d'un sondage régional et la déviation était de 20% entre estimation et mesures ponctuelles.¹ A partir des conclusions des études poolées de Ahlbom et al (2000) une extrapolation est proposée par ces auteurs ($RR = \exp 0,7 B$) où B est exprimé en μT . Petrini et collaborateurs calculent ensuite le nombre annuel de cas de leucémies de l'enfant (< 14 ans) attribuables à l'exposition aux lignes :

B (μT)	Population	Cas en excès
> 0,1	43400	0,84
> 0,4	16200	0,64
> 2	1300	0,20

En conclusion, les auteurs estiment que l'impact sanitaire est comparable aux évaluations faites à l'époque en Suède et au Royaume-Uni et que, dans l'hypothèse d'un effet sans seuil, l'impact principal viendrait de l'exposition à bas niveau d'une part majeure de la population.

La même approche est mise en œuvre dans un document² de l'ANPA³, qui reprend essentiellement les mêmes données et analyses et arrive aux mêmes conclusions.

3.3.5 Estimations produites en Belgique

Une estimation du nombre d'enfants exposés à des champs d'intensité moyenne supérieure à 0,4 μT , du fait de lignes de transport du courant, a été conduite en Belgique à partir d'une modélisation mathématique des champs générés par ces lignes.⁴

Pour une charge maximale des lignes, cette estimation trouve une proportion d'enfants exposés de 0,5 % du fait de la proximité de lignes 70 kV, 0,63 % pour des lignes 150 kV et 0,26 % pour 380 kV.

3.3.6 Estimations produites en France

L'étude conduite en Côte d'Or par EDF⁵ n'avait pas pour objectif d'estimer la proportion des habitats où l'exposition dépasse tel ou tel niveau de champ pour l'ensemble des habitations, mais seulement pour celles situées à proximité de lignes de transport du courant électrique. Cette étude a porté sur 237

¹ Petrini et al, 2001

² Curruroto et al, 2001

³ Agence nationale pour la protection de l'environnement (italienne)

⁴ Decat et al. 2003

⁵ Clinard et al. 2004

résidences réparties de la manière suivante :

- 60 situées à moins de 300 m de lignes 400 kV ;
- 62 situées à moins de 200 m de lignes 225 kV
- 130 situées à moins de 100 m de lignes 63 kV;

Les résultats suivants ont été obtenus :

- pour les 60 résidences (toutes individuelles) situées à proximité des lignes 400 kV, 5 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 µT (8,4 %) et 1 supérieur à 0,4 µT (1,7 %) ;
- pour les 62 résidences (toutes individuelles) situées à proximité des lignes 225 kV, 16 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 µT (25,8 %) et 6 supérieur à 0,4 µT (9,7 %) ;
- pour les 130 résidences (68 individuelles et 62 collectives) situées à proximité des lignes 63 kV, 18 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 µT (13,9 %) et 7 supérieur à 0,4 µT (5,4 %).

Ces données permettent à RTE d'estimer la population française exposée à plus de 0,4 µT du fait des lignes à haute tension à environ 375 000 personnes (0,6 %). Il faut toutefois souligner que les conclusions de cette étude sont limitées par sa petite taille et difficilement généralisables du fait de l'absence de représentativité des résidences incluses.

3.3.7 Variations de l'exposition

Dans la plupart des études épidémiologiques, l'exposition n'a pas fait l'objet d'une mesure individuelle directe, coûteuse et astreignante. Cette mesure de la "vraie exposition" contemporaine est le plus souvent remplacée par des calculs ou, au mieux, des mesures ponctuelles dans des lieux particuliers (par exemple la chambre du sujet ou à l'école). Des études méthodologiques ont tenté de répondre aux questions suivantes, essentielles pour assurer la validité des études épidémiologiques fondées sur les mesures ponctuelles :

- quelle doit être la durée de ces mesures, quelle est l'influence de la saison ou du cycle hebdomadaire ?
- quelle est leur reproductibilité dans le temps ?
- quelle est leur valeur prédictive de l'exposition contemporaine que donne une mesure individuelle ?
- quelle est leur valeur prédictive de l'historique de l'exposition ?

Une pré-étude conduite par le RTE, fondée sur la mesure individuelle pendant une semaine (15000 à 20000 points par enregistrement dosimétrique) considérée comme référence, sur 25 volontaires adultes montre la grande variabilité de l'exposition dans la journée en fonction des activités (travail, transport, loisirs, sommeil, jours ouvrés et week-end). La meilleure corrélation s'observe entre la moyenne sur la semaine et l'exposition résidentielle ($r = 0,55$). Si on prend en compte les expositions ponctuelles au domicile et sur le lieu de travail, on obtient une corrélation avec la moyenne de la semaine de $r = 0,61$. Cette étude confirme l'importance de mesures individuelles prolongées pour une estimation rigoureuse de l'exposition contemporaine, que les mesures ponctuelles dans les lieux de vie ne traduisent qu'imparfaitement.

3.4 Conclusion

Depuis les travaux initiaux de Wertheimer et Leeper, l'évaluation de l'exposition aux EBF a connu une amélioration considérable, de simples indicateurs comme le code de câblage, à la mesure *in situ*, puis à la mesure individuelle que permettent les enregistreurs portables. Chaque étape de cette progression a montré que la technique antérieure était un reflet très imprécis de l'exposition comparé aux possibilités de la nouvelle technique et a conduit à considérer avec réserves les conclusions des études épidémiologiques antérieures. Il serait actuellement illusoire par exemple de fonder une analyse du risque sur les études utilisant le code de câblage.

Ceci soulève le problème de la validité des études pour lesquelles la mesure individuelle de l'exposition des personnes, pendant un temps suffisant, n'a pas été réalisée.

Si l'on dispose maintenant d'outils permettant une quantification solide de l'exposition contemporaine (encore faut-il les utiliser...), il persiste de grandes incertitudes quant à l'historique de l'exposition qui est pourtant, dans toute étude en santé environnementale, le seul paramètre pertinent de l'exposition. On peut s'interroger par exemple sur les résultats que donnerait une telle approche pour évaluer les effets des rayonnements ionisants, quand on sait qu'ils sont décalés dans le temps de plusieurs années voire des dizaines d'années.

Il ne sera probablement pas possible d'apporter des réponses définitives à la question de l'effet éventuel des champs EBF sur la santé tant que l'incertitude ne sera pas soigneusement bornée et réellement prise en compte dans les études.

4 Etudes en laboratoire

Les résultats et conclusions sur les études effectuées en laboratoire, qui sont résumés ci-dessous, sont décrites en détails dans le livre bleu de l'ICNIRP publié en 2004 et dans les rapports susmentionnés.

La question principale étant celle du cancer et de la leucémie de l'enfant, ce résumé privilégie la cancérogenèse.

4.1 Études cellulaires

4.1.1 *Effets directs*

La grande majorité des études sur la cellule en culture a montré une absence d'effets génotoxiques et mutagènes des champs EBF. Les données récentes, utilisant majoritairement le modèle le plus utilisé en cytogénétique, les lymphocytes du sang humain, confortent cette affirmation pour des champs inférieurs à 5 mT.¹ On peut cependant signaler les travaux d'une équipe autrichienne² qui suggèrent que certains types cellulaires seulement, comme les fibroblastes, mais pas les lymphocytes humains, pourraient être sensibles à des expositions intermittentes. La poursuite de ce type de recherche est nécessaire et devra également être axée sur la synergie avec des facteurs chimiques et physiques, suggérée par plusieurs groupes.¹

4.1.2 *Effets indirects*

Apoptose et prolifération

Quelques résultats avaient montré que l'apoptose (mort cellulaire programmée) pourrait être favorisée au-dessus de 1 mT dans des cellules transformées ou cancéreuses, mais pas dans des cellules normales. Les récents travaux sur ce même sujet se sont avérés négatifs,³ mais il faudra mener d'autres études pour permettre d'atteindre des conclusions plus fermes sur l'effet de champs magnétiques EBF sur cet important processus biologique.

Signalisation

Une grande partie des recherches sur la signalisation intracellulaire a porté sur l'ion calcium qui joue un rôle majeur. Actuellement, on peut conclure, à partir des nombreuses études contradictoires sur cet ion, que peu d'effets attribuables aux champs magnétiques EBF ont été mis en évidence et aucun n'a été bien établi après études de réplication.⁴ L'effet de champs magnétiques sur certains récepteurs de la

¹ Verheyen et al., 2003 ;Pasquini et al., 2003; Cho et Chung, 2003; Stronati et al., 2004

² Ivancsits et al., 2002; Ivancsits et al., 2003a ;Ivancsits et al., 2003b

³ Verheyen et al., 2003

⁴ Madec et al, 2003

sérotonine a été découvert par le groupe de Fillion à l’Institut Pasteur¹. Dans ces expérimentations *in vitro*, le seuil était de l’ordre de 0,5 mT à 50 Hz. Des expérimentations récentes ont confirmé l’effet des EBF.²

Expression des gènes

De nombreuses expérimentations ont été réalisées sur des gènes variés, des modèles variés et avec des signaux et des niveaux de champs également distincts. Il n’existe pas aujourd’hui de résultats publiés fiables montrant un effet reproductible sur l’expression de gènes. L’exemple le plus marquant est l’augmentation de l’expression l’oncogène c-myc montrée dès 1990 par une équipe³ mais jamais retrouvée dans d’autres laboratoires.⁴

Des données récentes émergent l’idée que le patrimoine génétique pourrait influencer la réponse cellulaire, ce qui mérite d’être étudié avec attention.⁵ Les quelques résultats positifs rapportés dans ce sens sont de faible amplitude, en particulier en comparaison avec l’amplitude des effets induits par des promoteurs de tumeurs ou des facteurs de croissance.

4.1.3 Conclusion sur les études cellulaires

Au niveau cellulaire, il n’y a actuellement aucune preuve que l’exposition aux champs EBF puisse affecter les processus biologiques (au moins au-dessous de 100 µT) et en particulier dans des modèles liés au cancer. Les études sont souvent contradictoires à partir de modèles biologiques et de conditions d’exposition variés. Même dans différents laboratoires qui utilisent les mêmes conditions expérimentales, la confirmation de résultats publiés reste difficile. Deux processus méritent cependant une attention soutenue : il s’agit de la synergie de champs magnétiques EBF et de facteurs chimiques et physiques, ainsi que l’influence du potentiel génétique sur la réponse aux champs EBF. Les mécanismes biophysiques sont actuellement peu étudiés et les hypothèses valables débattues concernent des processus provoqués par les champs magnétiques EBF de plus de 100 µT.

4.2 Études animales

Depuis dix ans, un grand nombre d’études ont été réalisées sur des modèles animaux sous exposition à des champs magnétiques ou électriques EBF. Le résumé qui suit est basé, en particulier, sur les conclusions des rapports récents de groupes d’experts qui ont analysé la littérature scientifique disponible.⁶

Les sujets les plus souvent abordés ont concerné le cancer et en particulier les processus génotoxiques ou les altérations de la transduction du signal impliquée en cancérogenèse.

Des études sur la reproduction et le développement ont également été conduites sur des oiseaux ou des mammifères, ces derniers étant plus pertinents pour l’extrapolation à la santé humaine.

Les systèmes endocrinien, immunitaire et hématologique ont aussi été étudiés et en particulier

¹ Massot et al. 2000

² Espinosa et al. 2004

³ Wei et al., 1990

⁴ Desjobert et al., 1995 ; Saffer et al., 1995 ; Lacy-Hulbert et al., 1995 ; Miyakoshi et al., 1996 ; Owen, 1998 ; Morehouse et al., 2000

⁵ Mangiacasale, 2001 ; Tian et al., 2002 ; Czyz et al., 2004

⁶ NIEHS 1999 ; Doll 2001 ; IARC 2002 ; NRPB 2003

l'influence possible sur la mélatonine.

Enfin, le système nerveux, particulièrement susceptible d'être affecté par les champs électriques et les courants, a fait l'objet de nombreuses investigations.

4.2.1 Modèles concernant le cancer

Plusieurs approches expérimentales ont été mises en œuvre à l'aide de modèles animaux de cancer.¹

Génotoxicité

Il n'y a actuellement aucune preuve de l'existence d'effets génotoxiques des champs magnétiques EBF sur l'animal. Les rares effets positifs observés² doivent être interprétés avec prudence, en particulier en raison de l'exposition mal contrôlée, et leur extrapolation à la santé humaine reste extrêmement spéculative.

Initiation (bioassays)

Afin d'évaluer le caractère carcinogène des champs magnétiques EBF, quatre études de longue durée ont été pratiquées sur des rongeurs sains (bioassays), avec examen histopathologique de quarante tissus. Trois de ces études étaient faites sur le rat (deux études avec mâles et femelles³ et une avec des femelles⁴), et une étude sur des souris mâles et femelles⁵. Trois des quatre études (deux sur le rat et une sur la souris) n'ont donné aucun indice de l'induction de cancer dans les organes étudiés sous exposition aux champs magnétiques EBF. Dans la quatrième étude, l'incidence de tumeurs de la thyroïde⁶ (adénomes et carcinomes) était sensiblement augmentée chez les rats mâles exposés à des champs magnétiques EBF, mais seulement à deux intensités intermédiaires, c'est-à-dire sans relation dose-effet. Ces tumeurs n'étaient pas observées chez les rats femelles ni chez les souris mâles et femelles.

Une autre étude chronique de cancérogenèse, de moindre ampleur, a été conduite chez la souris pour détecter d'éventuels effets des champs magnétiques sur l'induction de leucémies, lymphomes ou cancers du cerveau. Elle a produit des résultats négatifs.⁷ Une excellente revue récente fait le point sur les modèles animaux et l'extrapolation des données chez l'homme.⁸

Modèles d'initiation ou de promotion

Deux études permettant de suivre les étapes de la carcinogenèse en combinant l'exposition à l'agent initiateur MNU⁹ à l'exposition aux champs magnétiques, statiques ou 50 Hz, ont été réalisées sur le rat dans un même laboratoire. La première étude a montré une augmentation de l'incidence de tumeurs mammaires due aux champs, indépendamment du MNU.¹⁰ La deuxième étude n'a montré aucun effet des

¹ pour revue : Boorman et al. 2000a&b ; McCann 2000 ; IARC 2002

² Svedenstal et al. 1999a&b

³ Mandeville et al. 1997; Yasui et al. 1997

⁴ Boorman et al. 1999

⁵ McCormick et al. 1999

⁶ Boorman et al., 1999

⁷ Kharazi et al., 1999 & Babbitt et al., 2000

⁸ Brain et al. 2003

⁹ N-methyl-N-nitroso-urée

¹⁰ Beniashvili et al., 1993

champs à des niveaux similaires.¹

Dans trois laboratoires différents, onze études ont été réalisées comportant les étapes successives de la carcinogenèse² en combinant l'exposition au DMBA³ avec des expositions à des champs magnétiques 50 ou 60-Hz. Un des laboratoires a effectué six études de 13 semaines et une de 27 semaines⁴ pour déterminer la relation dose-réponse.⁵ Ces études ont montré des augmentations significatives de l'incidence de tumeurs mammaires aux niveaux d'exposition les plus élevés. Une synthèse des résultats de ce laboratoire a montré une augmentation significative de l'incidence des tumeurs avec l'intensité du champ. Un deuxième laboratoire a conduit trois études pour répliquer ces résultats aux plus hautes intensités de champ.⁶ Dans l'une de ces études, aucune augmentation de l'incidence des tumeurs mammaires n'a été observée, tandis que dans les deux autres études, l'incidence élevée des tumeurs mammaires dans le groupe exposé fictivement rendait impossible l'observation d'augmentation éventuelle de la multiplicité de tumeur. Le troisième laboratoire a étudié l'effet de l'exposition intermittente aux champs magnétiques et n'a observé aucun changement de l'incidence des tumeurs ou de leur multiplicité dans deux expériences.⁷ Néanmoins, un élément nouveau a été apporté par le premier groupe⁸ qui a montré que l'effet observé ne se produisait que pour une lignée de la souche de rats Sprague-Dawley, différente de celle utilisée par le deuxième laboratoire. Une telle spécificité de l'effet des champs ne peut donc pas être exclue mais rend l'extrapolation à l'homme hasardeuse puisque, selon le CIRC, la preuve doit être fournie chez deux espèces animales (rats et souris) des deux sexes.

Huit études ont été réalisées dans cinq laboratoires différents sur la promotion et/ou la co-promotion de tumeurs de la peau sur la souris par des champs magnétiques 50/60-Hz. Les résultats de ces études furent généralement négatifs. Cependant, une accélération de la progression vers l'état malin a été observée dans une étude et un changement de la multiplicité des tumeurs dans une autre. Au total, ces résultats manquent de cohérence malgré l'utilisation d'un protocole commun. Une étude basée sur un modèle transgénique de souris a montré une accélération de la croissance des tumeurs de la peau sous exposition aux champs magnétiques.

Trois études ont été réalisées en utilisant un modèle de cancer du foie sur rats et souris soumis à des champs magnétiques 50-Hz (0,5-500 µT). Aucun effet n'a été observé dans les deux études sur le rat. Dans la troisième étude, dans laquelle des rayonnements ionisants étaient utilisés en présence ou absence de champs magnétiques, l'incidence de foyers basophiles était sensiblement augmentée chez les souris exposées, mais ceci n'était pas associé à une augmentation significative de l'incidence de cancer du foie.

Aucun effet n'avait été observé dans les études multi-étapes qui ont été effectuées sur des souris (normales ou transgéniques) et des rats pour évaluer les effets des champs sur le développement de leucémies transplantée et lymphomes induits chimiquement. Récemment le groupe de recherche de la Faculté de Pharmacie de Paris a rapporté en congrès des résultats sur les effets de champs magnétiques

¹ Anisimov et al. 1996

² initiation, promotion et progression

³ 7,12-diméthylbenz[a]anthracène

⁴ Thun-Battersby et al., 1999

⁵ Löscher, Mevissen et collaborateurs

⁶ Anderson et al., 1999

⁷ Ekström et al., 1998

⁸ Fedrowitz et al., 2004

50 Hz (avec ou sans harmoniques), à 100 µT, sur un modèle de leucémies induites chimiquement chez le rat. Il s'agit d'un modèle de leucémie aiguë lymphoblastique (LAL) qui est proche de la leucémie de l'enfant. Les 400 animaux étaient exposés dès l'âge de 12 semaines jusqu'à la fin de leur vie et divers paramètres mesurés. Aucun effet de l'exposition n'a été trouvé sur la durée de la survie, l'incidence des leucémies, le type de leucémie et le rôle des harmoniques.¹

Il est donc admis aujourd'hui que l'exposition aux champs magnétiques EBF ne constitue pas un initiateur du processus cancérogène. Ces champs n'induisent pas d'altération de l'ADN ni de mutations. Pour ce qui est de la phase de promotion, il existe néanmoins des observations, non cohérentes, qui indiquent que ces champs pourraient affecter la croissance de tumeurs mammaires, au moins dans certaines lignées particulièrement sensibles de souches de rat.

4.2.2 Conclusion sur les études animales et cellulaires

La grande majorité des études *in vitro* sur des effets des champs magnétiques EBF s'est révélée négative, sauf pour des intensités supérieures à 100 µT, c'est-à-dire bien au-dessus des valeurs des champs susceptibles d'être produits dans un environnement domestique.

Il est habituel de tester les carcinogènes à des niveaux bien supérieurs à ceux normalement présents dans l'environnement afin de démontrer leur existence, en présupposant qu'il existe une relation dose-réponse. Cependant, une telle hypothèse n'est peut-être pas justifiée dans le cas des agents non-génotoxiques et l'évaluation des risques doit s'appuyer sur des niveaux expérimentaux réalistes.

De façon générale, l'hypothèse que l'exposition aux champs électromagnétiques EBF augmente le risque de cancer chez l'animal n'est pas retenue sur la base des données expérimentales publiées. Pourtant, un effet sur la promotion de tumeurs mammaires de champs magnétiques EBF ne peut être exclu. Les conséquences d'un tel effet en termes de santé humaine sont impossibles à prévoir actuellement en l'attente de données complémentaires, sachant qu'un mécanisme intervenant sur une espèce animale peut n'avoir aucun effet chez l'homme.

La recherche qui doit être approfondie concerne donc essentiellement les modèles de leucémie chez le rongeur.

4.3 Études humaines

De nombreuses études expérimentales avaient été effectuées sur des volontaires, en général des adultes jeunes et sains. Ces études sont utiles pour évaluer certains effets aigus sur la physiologie et le comportement, mais ne peuvent concerner le cancer et les effets à long terme.

La plupart des investigations humaines sur la génotoxicité ont été faites sur des personnes exposées professionnellement à l'électricité (conducteurs de train, travailleurs des lignes HT, etc.). Dans les rares cas où des dommages cytogénétiques ont été observés, d'autres facteurs de l'environnement étaient en cause.

Dans les quelques études sur le système immunitaire, des diminutions mineures du nombre de

¹ Bernard et al., 2004

leucocytes circulant ont été constatées sans incidence prévisible sur la santé puisque l'exercice physique produit également des altérations des sous-populations lymphocytaires. De même aucune preuve de modification de la formule sanguine n'est actuellement acquise.

Les études sur le système endocrinien ont porté essentiellement sur les niveaux de l'hormone mélatonine qui augmentent naturellement durant la nuit. Cette hormone a une grande importance du fait de son rôle dans la sécrétion d'autres hormones et de la régulation du rythme circadien. Chez l'homme, aucun effet n'a été observé, soit en raison d'une réponse différente de celle du rongeur soit à cause de la grande variabilité qui existe entre individus au sein des groupes de volontaires.¹ On ne peut donc pas exclure qu'un effet existe chez certains sujets sensibles ni tirer des conclusions sur les conséquences sur leur santé.

Les études sur les fonctions cognitives ont été résumées récemment² (mémoire, attention, traitement de l'information, perception du temps). Les conditions sont très variées en termes de types de champs, d'intensité et de nature des tests cognitifs. Les résultats ne sont pas cohérents ; ils sont de faible amplitude quand ils sont positifs transitoires et non reproductibles. Ils sont difficiles à extrapoler en termes de santé publique. La nature des structures cérébrales qui pourraient être sensibles aux champs magnétiques n'est pas identifiée.

En conclusion, les études humaines ont été peu nombreuses depuis la publication des rapports récents et peu d'éléments nouveaux sont disponibles. Rien n'indique en laboratoire que des effets sanitaires puissent résulter d'exposition humaines à des niveaux de l'ordre de 100 µT et au-dessous.

¹ Selmaoui et al. 1997

² Crasson, 2003

5 Etudes épidémiologiques

5.1 Champs EBF et cancer de l'enfant

5.1.1 *Introduction*

On dispose actuellement des résultats d'un grand nombre d'études épidémiologiques visant à mettre en relation l'exposition aux champs électriques et magnétiques EBF et les effets sur la santé. D'importantes difficultés méthodologiques propres à ce type d'étude n'ont pas permis, jusqu'à ce jour, d'établir de façon certaine l'existence d'un lien causal entre l'exposition aux champs EBF et les pathologies étudiées. Nous nous limitons ici à décrire les recherches sur l'exposition aux champs magnétiques EBF en rapport avec le cancer de l'enfant, qui ont fait l'objet des développements méthodologiques les plus poussés, et qui posent le plus d'interrogations à l'heure actuelle. L'interprétation des résultats de ces recherches nécessite de prendre en considération certains problèmes méthodologiques, que nous abordons ici succinctement. Les principales études épidémiologiques sur le sujet sont résumées sous forme d'un tableau de synthèse.

5.1.2 *Principaux problèmes méthodologiques*

La détermination des niveaux d'exposition aux champs magnétiques est particulièrement complexe :

- Dans la population, l'exposition aux champs magnétiques EBF est ubiquitaire et peut varier de façon importante d'un point de l'espace à l'autre et d'un instant à l'autre. Ces caractéristiques rendent particulièrement difficile la définition de groupes de sujets dont les expositions moyennes diffèrent clairement sur le long terme. Or la mise en évidence d'un lien entre une exposition et une maladie suppose que des groupes ayant des expositions contrastées puissent être définis et comparés.
- Les études réalisées pour étudier l'effet des champs magnétiques sur le risque de cancer chez l'enfant sont toutes rétrospectives, le plus souvent de type cas-témoins, et ne permettent pas de mesurer directement l'exposition aux champs magnétiques survenue avant l'apparition du cancer, la seule période d'intérêt sur le plan étiologique. Seules des études de cohortes prospectives qui permettraient en théorie de mesurer directement les expositions aux champs magnétiques de la population permettraient une estimation précise et pertinente de l'exposition, mais elles nécessiteraient de suivre pendant plusieurs années un très grand nombre d'enfants, y compris au cours de la période prénatale, et ne sont pas envisageables en pratique. Dans les études réalisées, les méthodes d'évaluation des expositions mises au point ne reflètent donc l'exposition passée des sujets que de façon imparfaite. Une autre difficulté tient au fait qu'on ne connaît ni la durée d'exposition ni le temps d'induction nécessaires à l'apparition d'un cancer donné chez l'enfant, ce qui permettrait de situer avec précision dans le temps la période d'intérêt sur le plan étiologique.
- La méconnaissance des mécanismes de cancérogénicité des champs magnétiques, pour autant

qu'ils existent, ne permet pas non plus de déterminer le paramètre d'exposition pertinent à prendre en compte (expositions moyennes, expositions cumulées, pics d'exposition, temps passé au-dessus d'un certain niveau de champ, etc.).

L'ensemble de ces difficultés est à l'origine d'erreurs de classement lors de l'attribution des niveaux d'exposition chez les sujets étudiés. On peut considérer que ces erreurs de classement sont de type non différentiel dans presque toutes les études réalisées, c'est-à-dire que les cas de cancer et leurs témoins y sont soumis de la même façon. Dans les situations les plus habituelles, ce type d'erreur a plutôt tendance à masquer les éventuelles associations existantes entre exposition et cancer qu'à révéler des associations qui n'existent pas.

Les autres types d'erreurs systématiques qui peuvent entacher les résultats des études épidémiologiques sont :

- les biais de sélection, notamment ceux qui pourraient être liés à de faibles taux de participation chez les témoins. Si l'exposition aux champs magnétiques chez les témoins participant à l'étude est différente de l'exposition de l'ensemble des témoins sollicités, il en résulte une erreur, en plus ou en moins, dans la mesure d'association entre champ magnétique et cancer de l'enfant. On ne peut exclure totalement l'existence de tels biais dans les études réalisées.
- les effets de confusion introduits par des facteurs corrélés à l'exposition aux champs magnétiques. Ces facteurs devraient être eux-mêmes des facteurs de risque de la leucémie chez l'enfant pour pouvoir jouer un rôle de confusion dans la relation exposition aux champs magnétiques – cancer de l'enfant. Parmi les facteurs envisagés (catégorie socioprofessionnelle des parents, présence de routes à grand trafic à proximité des habitations), un effet de confusion n'a pas été clairement démontré. On ne peut toutefois exclure le rôle éventuel de facteurs de risque non identifiés des cancers de l'enfant.

5.1.3 Association entre champs magnétiques et cancer de l'enfant

Méthodes d'évaluation des expositions

Les principales études épidémiologiques réalisées jusqu'à ce jour sont décrites de façon synthétique dans le tableau 5.1. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour apprécier les expositions aux champs magnétiques auxquelles les enfants ont été exposés.

Code de câblage (wiring code)

Cette méthode a été utilisée dans la première étude épidémiologique réalisée.¹ Elle consiste à déterminer le niveau d'exposition aux champs magnétiques dans l'habitation en fonction du type de lignes électriques à proximité. Elle permet de déterminer 4 à 5 classes d'exposition croissante. Cette méthode est imprécise, comme il est dit plus haut, mais ne requiert pas l'accès au domicile des sujets, ce qui permet en général d'augmenter les taux de participation.

Calcul historisé du champ magnétique

Cette méthode a été utilisée dans les études scandinaves. Elle permet de déterminer le champ

¹ Wertheimer & Leeper, 1979

magnétique à l'intérieur des habitations d'après le type de ligne électrique, la distance à l'habitation, et la charge annuelle en courant électrique dans chacune des lignes, connue au cours des années passées. Cette méthode historisée a l'avantage de tenir compte des expositions survenues avant le diagnostic de cancer. Elle permet de tenir compte de l'exposition provenant des lignes haute-tension, mais ne peut être appliquée à l'ensemble des lignes de distribution du courant électrique.

Mesure du champ magnétique

Des mesures d'ambiance peuvent être effectuées par des dosimètres placés pendant quelques heures dans des lieux précis de l'habitation. Des études plus récentes ont également utilisé des dosimètres individuels portés par les sujets au cours d'une certaine période, qui permettent de prendre en compte les expositions aux champs magnétiques provenant de plusieurs sources. L'absence de représentativité de ces mesures par rapport aux expositions passées d'intérêt doit être considérée.

Pour une discussion plus détaillée concernant les problèmes méthodologiques des études épidémiologiques, on peut consulter par exemple la revue publiée par l'ICNIRP.¹

¹ ICNIRP 2004

Tableau 5.1 Principales études sur les cancers de l'enfant et les champs magnétiques et leurs caractéristiques

Référence	Population étudiée	Principale méthode d'évaluation	Type d'étude	Cancers (nombres cas/témoins)	RR code de câblage ou calcul (IC95%) (catégorie d'expo max)	RR champ magnétique mesuré (IC95%) (catégorie d'expo max)
Wertheimer & Leeper, 1979 ¹	Résidents de Denver nés dans le Colorado. Cas : <19 ans, décès 1950-73 Témoins : certificats de décès	Code ¹ au diagnostic/au décès	cas-témoins	Tous cancers (328/328) Leucémies (155/155) Tumeurs cerveau (66/66)	2.25 (HCC ²) 2.98 (1.78-4.98) (HCC) 2.40 (1.03-5.41) (HCC)	- - -
Fulton et al., 1980	Résidents de Rhode Island Cas : <20 ans. Témoins : certificats de décès	Code. Cas : tous les logements/ témoins : à la naissance	cas-témoins	Leucémies (119/240)	1.00 (HCC)	-
Toinenius, 1986	Résidents de la région de Stockholm, Suède. Cas : <19 ans. Témoins : certificats de décès	Mesures porte d'entrée : logement à la naissance, au diagnostic	cas-témoins	Tous cancers (1033/890) Leucémies (243/212) Tumeurs cerveau (294/253)	- - -	1.8 (>0.3µT) 0.3 (>0.3µT) 3.7 (>0.3µT)
Savitz et al., 1988	Résidents de Denver, Colorado. Cas : <15 ans (1976-83). Témoins : composition de numéros de téléphone au hasard	Code (C). Mesures (M) ponctuelles dans la chambre de l'enfant, à basse puissance	cas-témoins	Tous cancers : C 320 / M 128 Leucémies : C 97 / M 36 T. cerveau : C 59 / M 25 Témoins : C 259 / M 207	2.20 (0.98-5.21) (VHCC ³) 2.75 (0.94-8.04) (VHCC) 1.94 (0.47-7.95) (VHCC)	1.35 (0.63-2.90) (>0.25µT) 1.93 (0.67-5.56) (>0.25µT) 1.04 (0.22-4.82) (>0.25µT)
Myers et al., 1990	Résidents du Yorkshire, Angleterre. Cas : <15 ans (1970-1979). Témoins : registre des naissances	Distance habitation-ligne électrique aérienne ; champ magnétique estimé	Cas-témoins	Tous cancers (374/588)	1.10 (0.47-2.57) (<25 m dist) 0.4 (0.04-4.33) (>0.1µT)	-

¹ Code = code de câblage ou « wire code »

² HCC = High Current Configuration

³ VHCC = Very High Current Configuration

Tableau 5.1 Suite

London et al., 1991	Résidents comté de Los Angeles. Cas : <10 ans (1980-1987). Témoins : amis et n° de téléphone au hasard	Code (C) et mesure (M) de 24 h dans la chambre de l'enfant de la résidence la plus longtemps occupée, basse puissance	cas-témoins	Leucémies : C 211/ M 162 Témoins : C 205 / M 143	2.15 (1,08-4,26) (VHCC)	1.22 (0.52-2.82) (>0.125µT)
Feychting et Ahlbom, 1993	Suède : résidents à moins de 300 m des lignes 220 ou 400 kV. Cas : <15 ans (1960-1985). Témoins : tirés au sort dans la cohorte appariés aux cas	Calcul historisé des champs magnétiques	cas-témoins dans cohorte	Tous cancers (141) Leucémies (38) Tumeurs cerveau (33) Témoins (554)	1.3 (0.6-2.7) (>0.3µT) 3.8 (1.4-9.3) (>0.3µT) 1.0 (0.2-3.9) (>0.3µT)	-
Olsen et al., 1993	Résidents du Danemark. Cas <15 ans. Témoins : registre central de la population	Calcul historisé des champs magnétiques	cas-témoins	Tous cancers (1707/4788) Leucémies (833/1666) Tumeurs cerveau (624/1872)	5.6 (1.6-19) (>0.4µT) 6.0 (0.8-44) (>0.4µT) 6.0 (0.8-44) (>0.4µT)	-
Verkasalo et al., 1993	Finlande : résidents à moins de 500 m des lignes 110-400 kV. Cas < 17 ans (1974-1990)	Calcul historisé des champs magnétiques	Cohorte	Tous cancers (140) Leucémies (833/1666) Tumeurs cerveau (624/1872)	1.5 (0.74-2.7) (>0.2µT) 1.6 (0.32-4.5) (>0.2µT) 2.3 (0.75-5.4) (>0.2µT)	-
Preston-Martin et al., 1996	Résidents comté de Los Angeles. Cas < 20 ans (1984-1991). Témoins : composition de n° de téléphone au hasard	Code au diagnostic, de la première et de la plus longue résidence	cas-témoins	T. cerveau : C 281 / M 106 Témoins : C 250 / M 99	1.2 (0.6-2.2) (VHCC)	1.7 (0.6-5.0)(>0.3µT)
Gurney et al. 1996	Résidents de Seattle et de l'état de Washington ouest. Cas < 20 ans (1984-1990). Témoins : composition de n° de téléphone au hasard	Code de la résidence au diagnostic	Cas-témoins	T. cerveau (120/240)	0.5 (0.2-1.6) (VHCC)	-

Tableau 5.1 Suite

Tynes et Haldorsen, 1997	Résidents en Norvège près de lignes HT au recensement. Cas <15 ans (1965-1989). Témoins tirés au sort dans la cohorte appariés aux cas	Calcul historisé des champs magnétiques	Cas-témoins dans cohorte	Tous cancers (532/2112) Leucémies (139/546) T. cerveau (144/599)	0.9 (0.5-1.8) (>0.14µT) 0.3 (0.0-2.1) (>0.14µT) 0.7 (0.2-2.1) (>0.14µT)	- - -
Linet et al., 1997	Résidents de 9 états US (ouest et atlantique). Cas <15 ans (1989-1993). Témoins : composition de n° de téléphone au hasard	Code (C) des résidences >70% 5 ans avant le diagnostic ; Mesures (M) de toutes les résidences combinées >70% 5 ans avant le diagnostic	cas-témoins	LLA ¹ : C 402 / M 624 Témoins : C 402 / M 615	0.88 (0.48-1.63) (VHCC)	1.24 (0.86-1.79) (>0.2µT) 1.72 (1.03-2.86) (>0.3µT)
Michaelis et al., 1997	Résidents de Basse-Saxe et de Berlin, Allemagne. Cas < 15 ans (1991-1995). Témoins : registre gouvernemental	Mesures de 24 heures dans la chambre de l'enfant	Cas-témoins	Leucémies (176/414)	-	2.3 (0.8-6.7) (>0.2µT)
Dockerty et al. 1998	Résidents de Nouvelle-Zélande. Cas < 15 ans (1990-1993). Témoins : certificats de naissance	Mesures de 24 h dans la chambre de l'enfant	Cas-témoins	Leucémies (115/117)	-	15.5 (0.3-7.6) (>0.2µT)
McBride et al. 1999	Canada, résidents de 5 provinces. Cas <15 ans (1990-1994). Témoins : liste d'assurés sociaux	Code des habitations 2 années avant le diagnostic. Mesures individuelles sur 48 heures	Cas-témoins	Leucémies Code (303/309) Dosimétrie individuelle sur 48 heures (293/339) Mesures chambre de l'enfant sur 24 h (272/304)	0.77 (0.37-1.60) (VHCC)	1.04 (0.69-1.57) (>0.2µT) 1.27 (0.69-2.33) (>0.2µT)

¹ LLA = leucémie lymphoblastique aiguë

Tableau 5.1 Suite

Green et al. 1999	Résidents d'Ontario, Canada. Cas < 15 ans (1985-1993). Témoins: listes téléphoniques commerciales	Code ; Mesures ponctuelles ; Mesures individuelles sur 48 h	Cas-témoins	Leucémies Code (79/125) Mesures ponctuelles (21/46) Dosimétrie individuelle sur 48 heures (88/133)	1.5 (0.3-8.7) (HCC)	1.13 (0.31-4.06) (>0.4µT) 4.5 (1.3-15.9) (>0.14µT)
UK Childhood cancer study 1999	Résidents d'Angleterre, Pays de Galles, Ecosse. Cas <15 ans (1992-1995). Témoins : registre des services de santé familiale	Mesures dans l'habitation. Phase I : mesures de 90 min dans la pièce principale, et dans la chambre de l'enfant. Phase II (pour les 10% les plus élevés) : mesures de 48 h dans la chambre de l'enfant. Mesures ponctuelles à l'école.	cas-témoins	Tous cancers (2265/2270) Leucémies (1094/1096) Tumeurs cerveau (390/393)	- - -	0.89 (0.34-2.32) (>0.4µT) 1.68 (0.40-7.10) (>0.4µT) 0 cas/2 témoins (>0.4µT)

5.2 Résultat des études épidémiologiques

Depuis la publication en 1979 de la première étude ayant suggéré une association entre les champs électriques et magnétiques d'extrême basse fréquence (EBF) et la leucémie de l'enfant, de nombreuses études épidémiologiques, de plus en plus élaborées, ont examiné cette association. Des articles de revue en grand nombre, des méta-analyses,¹ et plus récemment deux analyses « poolées »² regroupant les données de plusieurs études épidémiologiques, ont été publiées. Dans l'une de ces analyses « poolées », fondée sur les 9 principales études sur la leucémie de l'enfant, toutes de bonne qualité sur le plan méthodologique,³ on a pu observer que les expositions à des champs magnétiques EBF à des niveaux inférieurs à 0,4 µT n'entraîne pas d'augmentation du risque, mais qu'au-dessus de 0,4 µT le risque de leucémie de l'enfant est multiplié par 2. Cette augmentation du risque concernerait 0,6% de la population européenne exposée à ce niveau, ce chiffre pouvant varier sensiblement d'un pays à l'autre. La seconde analyse « poolée » comporte 15 études sélectionnées selon des critères moins restrictifs, et utilise la valeur de 0,3 µT pour définir les niveaux d'exposition les plus élevés.⁴ Les résultats de ces deux analyses sont totalement cohérents.

Il est important de noter que les niveaux d'exposition estimés, en particulier la valeur critique de 0,4 µT (ou 0,3 µT dans la seconde analyse), correspondent à une valeur moyenne pondérée sur toute la durée d'exposition des sujets. Par ailleurs ces niveaux sont estimés à partir de méthodes différentes selon les études. Dans les études scandinaves⁵, ils correspondent à un calcul historisé d'exposition aux champs magnétiques provenant des lignes haute-tension à proximité des lieux de résidence, alors que dans les études canadiennes par exemple⁶, utilisant des dosimètres individuels, ils intègrent l'ensemble des sources d'exposition possibles.

À l'inverse de ces résultats qui concernent les champs magnétiques EBF, les éléments d'évaluation scientifique permettant de relier les champs électriques à la leucémie de l'enfant sont insuffisants.

Les études portant sur les tumeurs du cerveau chez l'enfant, ou sur des cancers d'autres localisations, n'ont pas permis d'observer des relations consistantes avec les champs électriques et les champs magnétiques EBF. Toutefois, ces études sont généralement de plus petite taille, et ont été de moins bonne qualité.

L'association entre la leucémie de l'enfant et l'exposition à des niveaux élevés de champs magnétiques n'est certainement pas une observation liée à l'effet du hasard, mais il est possible que certains biais aient pu renforcer ce résultat. Des biais de sélection, en particulier, peuvent expliquer en partie l'association observée. Ces biais sont particulièrement susceptibles de survenir dans les études cas-témoins basées sur des mesures à domicile, du fait des taux de participation peu élevés obtenus pour plusieurs d'entre elles. Les études conduites dans les pays scandinaves, dans lesquelles l'exposition historisée aux

¹ Analyse permettant d'estimer un risque « moyen » lié à l'exposition sur plusieurs études, le plus souvent en partant des résultats publiés.

² Type particulier de méta-analyse dans laquelle les données individuelles pertinentes de toutes les études sont regroupées en un seul fichier qui fait l'objet d'une analyse statistique

³ Ahlbom et al. 2000

⁴ Greenland et al. 2000

⁵ Feychting & Ahlbom 1993 ; Olsen 1993 ; Verkasalo 1993 ; Tynes & Haldorsen 1997

⁶ McBride 1999; Green 1999

champs magnétiques est calculée, ne sont pas sujettes à des biais de sélection, mais ont l'inconvénient de ne porter que sur de très petits effectifs de sujets exposés. Les techniques d'évaluation des champs électriques et magnétiques ont connu des améliorations très importantes au cours du temps, mais des erreurs de classement ont pu survenir dans toutes les études. Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, des erreurs de classement non différentielles (survenant avec la même probabilité chez les cas et chez les témoins) ont toute chance de biaiser les résultats vers l'absence d'association. Enfin, il est peu vraisemblable que des biais liés à des facteurs de confusion puissent expliquer entièrement les effets observés. Toutefois, il est possible qu'un certain niveau de confusion, lié à d'autres facteurs de risque de la leucémie, soit présent dans les études, agissant dans le sens d'une sur-estimation ou d'une sous-estimation des risques. On ne peut pas exclure non plus qu'une combinaison de biais de sélection, d'un certain degré de confusion, et de hasard explique les résultats observés. Si la relation observée entre la leucémie de l'enfant et l'exposition aux champs magnétiques était de nature causale, le risque associé à l'exposition pourrait également être plus élevé que ce qui a été décrit et inversement.

Dans un rapport publié en juin 2002, trois experts du « California Department of Health Services » concluaient « *qu'ils étaient enclins à croire que les champs électromagnétiques peuvent entraîner une augmentation du risque de leucémie de l'enfant et d'autres pathologies* ». Ils concluaient également « *croire fortement que les CEM ne sont pas des cancérogènes universels, car de nombreux types de cancers ne sont pas associés avec l'exposition* »¹

L'ensemble des éléments disponibles, et notamment les analyses groupées portant sur la leucémie de l'enfant, ont conduit le CIRC² à considérer qu'il existait une évidence limitée d'un risque accru de leucémie de l'enfant lié à l'exposition aux champs magnétiques EBF, et à classer cette exposition dans la catégorie 2B des cancérogènes possibles.³ Les données disponibles portant sur les autres types de cancer de l'enfant ou chez l'adulte, ainsi que sur l'exposition aux champs électriques EBF, ont été jugées inadéquates.

5.3 Conclusions sur les études épidémiologiques

Depuis la publication de l'étude de Wertheimer et Leeper en 1979, les études épidémiologiques sur la leucémie de l'enfant en rapport avec les champs magnétiques ont fait d'importantes avancées sur le plan méthodologique (choix des sujets, taille de l'étude) et technique (mesure de l'exposition). On peut considérer que les méta-analyses de Ahlbom et Greenland, incluant les principales études sur le sujet, résument au mieux l'état actuel des connaissances. Elles indiquent la possibilité d'un risque de leucémie augmenté chez les enfants les plus exposés. On peut regretter l'absence de données françaises dans ce domaine de recherche qui a mobilisé d'importants moyens au niveau international. Actuellement, une nouvelle étude à visée étiologique aurait peu de chances d'apporter des éléments décisifs, quelles que soient ses améliorations techniques et méthodologiques,

D'autres pathologies, cancéreuses ou non cancéreuses survenant chez l'enfant ou l'adulte, n'ont pas été décrites ici, car elles ne faisaient pas l'objet de la mission, mais le groupe de travail souhaite

¹ Rapport de Neutra, DelPizzo et Lee

² Centre International de Recherche sur le Cancer (IARC en anglais)

³ IARC 2002

également mentionner l'existence de recherches épidémiologiques destinée à étudier le rôle des champs EBF dans la survenue de ces pathologies (tumeurs du cerveau, cancer du sein, maladie d'Alzheimer, sclérose latérale amyotrophique, etc). Aucun lien avec les champs magnétiques n'a été établi, et les études réalisées sont jugées globalement non cohérentes. Toutefois, de nombreuses études souffrent encore de faiblesses méthodologiques qui en limitent la portée.

6 Quantification du risque

La quantification du risque suppose en prémisses que l'association entre l'exposition aux champs magnétiques EBF et le risque de leucémie de l'enfant est causale, ce qui n'est pas établi. Le classement 2B établi par le CIRC (cancérogène possible) traduit à la fois l'absence de certitude et l'importance du faisceau de présomption en faveur de la cancérogénicité des champs. Ce classement, réalisé dans le cadre d'une expertise internationale rigoureuse, repose exclusivement sur les observations épidémiologiques.

6.1 Peut-on évaluer une relation dose-effet ?

Les études expertisées par le CIRC n'évoquent pas l'existence d'une *relation dose-risque*, ni en termes d'intensité d'exposition, ni en termes de durée d'exposition. Elles ne mettent pas non plus en évidence un *seuil d'exposition* : si des risques relatifs de leucémie de l'enfant significativement élevés ont été estimés par méta-analyse au-delà des valeurs de 0,3 µT (Greenland et al., 2000) ou 0,4 µT (Ahlbom et al., 2000), les études ne prouvent pas l'absence de risque en deçà de ces valeurs.

La littérature ne permet pas d'évoquer une *période d'exposition* qui serait particulièrement inductrice de risque. Elle ne suggère pas non plus l'existence d'un temps de latence ou d'une tranche d'âge chez l'enfant spécifiquement concernée.

Enfin, rien n'indique que l'association puisse être spécifique d'un type cytologique de leucémie aiguë.

Les 2 méta-analyses publiées donnent des estimations proches du risque relatif de leucémie aiguë de l'enfant associée aux champs magnétiques EBF (RR=1,7 au delà de 0,3 µT d'après Greenland et al., 2000, à partir de 12 études, et RR = 2,0 au delà de 0,4 µT d'après Ahlbom et al., 2000, à partir de 9 des 12 mêmes études).

6.2 Exposition des enfants de moins de 15 ans

Il n'y a pas actuellement de base de données permettant de décrire l'exposition moyenne de la population française aux champs EBF. Il n'est donc pas possible aujourd'hui d'identifier les sujets exposés au-delà d'une valeur donnée.

D'après les données internationales, on peut supposer qu'environ 1,8% des enfants français sont exposés à des champs de 0,3 µT ou plus (proportion d'enfants exposés de l'analyse poolée publiée par Greenland et al., 2000), et 0,6% à des champs de 0,4 µT ou plus (proportion d'enfants témoins exposés dans l'analyse poolée publiée par Ahlbom et al., 2000).

Parmi les résidences exposées à des champs de plus de 0,2 µT, l'étude britannique a estimé à 11,4% la part d'exposition imputable aux lignes HT, alors que cette part a été estimée à environ 29% par l'étude allemande. Si l'exposition aux lignes HT contribue de façon minoritaire aux expositions élevées, les sujets

vivant à proximité immédiate des lignes HT, bien que peu nombreux, constituent potentiellement une population surexposée.

6.3 Nombre de leucémies imputables aux EBF chez les enfants

L'objet de la quantification du risque est de calculer le nombre de cas potentiellement imputables à l'exposition.

Elle suppose trois hypothèses :

- l'exposition aux champs magnétiques EBF est bien une cause de leucémie de l'enfant,
- la distribution de l'exposition aux champs magnétiques EBF des enfants français est comparable à celle qui a été estimée par les méta-analyses publiées,
- le risque relatif a été correctement estimé par les méta-analyses publiées.

Le nombre n de cas attribuables aux champs magnétiques EBF a été calculé sous différentes estimations disponibles du risque relatif (tableau 6.3). Il s'obtient facilement par la formule $n = f \times N \times TI \times (RR - 1)$, dans laquelle RR est le risque relatif de leucémie avant l'âge de 15 ans des enfants exposés aux champs EBF par rapport aux enfants non exposés. TI est le taux d'incidence des leucémies aiguës chez l'enfant de moins de 15 ans. N est l'effectif de la population de moins de 15 ans, f est la fréquence de l'exposition dans la population des enfants de moins de 15 ans.

L'intervalle de confiance de n a été calculé en supposant sa distribution Log normale, et en utilisant l'approximation $\text{var}(\ln(n)) = \text{var}(f) / f^2 + \text{var}(RR) / (RR - 1)^2$ de la variance de son logarithme ; la variance du risque relatif, $\text{var}(RR)$, a été approchée par $\text{var}(\ln(RR)) = RR^2$.

La population française métropolitaine comptait $N = 10\,449\,339$ enfants de moins de 15 ans lors du recensement de population de 1999.

Le taux d'incidence des leucémies de l'enfant est estimé en France à $TI = 42,5$ cas/million et par an (Registre National des Leucémies et Lymphomes de l'Enfant, estimation sur la période 1990-1999). Le tableau suivant rapporte les estimations de nombre n de cas attribuables s'appuyant sur les analyses poolées publiées d'Ahlbom et de Greenland :

Tableau 6.3 : Estimation du nombre de cas de leucémie de l'enfant qui serait annuellement imputable aux CEM-EBF si ceux-ci s'avéraient être effectivement une cause de leucémie. Cette estimation est basée sur les chiffres des 2 analyses poolées.

	RR	IC95%	f	n	IC95%
Champs magnétiques $\geq 0,4 \mu\text{T}$ (analyse poolée de Ahlbom et al. 2000)					
Champs mesurés (5 études)	1,9	[1,1-3,2]	$25 / 3\,547 = 0,70\%$	2,8	[0,9-9,3]
Champs calculés (4 études)	2,1	[0,9-4,9]	$37 / 6\,853 = 0,54\%$	2,6	[0,6-14,3]
Total (9 études)	2,0	[1,3-3,1]	$62 / 10\,400 = 0,60\%$	2,6	[1,1-6,5]
Champs magnétiques $\geq 0,3 \mu\text{T}$ (analyse poolée de Greenland et al. 2000)					
Total (12 études)	1,7	[1,3-2,3]	$130 / 7\,084 = 1,84\%$	5,3	[2,4-11,6]

f : fréquence de l'exposition aux champs EBF chez les enfants de moins de 15 ans; IC95% intervalle de confiance à 95%; n : nombre de cas attribuables aux champs EBF ; RR : risque relatif

6.4 Conclusion sur l'évaluation du risque

En l'absence de données françaises sur la proportion d'enfants exposés, l'évaluation du risque de leucémie de l'enfant s'appuie nécessairement sur les données internationales et sur l'expertise scientifique réalisée par le CIRC.

Sous certaines conditions, c'est-à-dire si l'exposition à 0,3 µT ou plus est effectivement un facteur de risque de leucémie chez l'enfant, et si ce niveau d'exposition concerne un peu moins de 2% des enfants de moins de 15 ans, 2 à 12 cas pourraient être imputables chaque année en France aux champs magnétiques EBF quelle qu'en soit l'origine, soit une moyenne de 53 cas sur 10 ans. L'utilisation de la limite de 0,4 µT ou plus et des chiffres de Ahlbom et al. donne des estimations plus basses, de 1 à 7 cas par an, soit en moyenne 26 cas de leucémie sur 10 ans.

7 Recommandations pour la gestion du risque

Ainsi qu'il était indiqué dans l'introduction, la mission du groupe d'experts impliquait seulement la suggestion de mesures de gestion du risque afin d'aider les décideurs.

Ce processus doit être engagé dans un contexte international actuel qui est marqué par :

- la diversité des situations d'exposition des populations et la méconnaissance globale de ces expositions, en particulier les plus élevées,
- l'existence d'un seul effet sanitaire, dont la causalité n'est pas établie, concernant les leucémies de l'enfant et les champs magnétiques,
- la nature des craintes et les mesures prises en conséquences dans les différents pays,
- les réglementations nationales et trans-nationales,
- le faible niveau de la recherche sur les effets sanitaires des EBF,
- la confusion actuelle sur la nature du Principe de Précaution et les efforts faits par l'OMS pour clarifier le débat dans le cadre du Cadre de Précaution.

Les éléments ci-dessous tiennent compte de ces données actuelles.

7.1 Évaluation de l'exposition

L'exposition de la population française aux EBF n'est connue que de manière très approximative, par inférence à partir d'études conduites dans d'autres pays (ex : au Royaume-Uni et en Allemagne où les réseaux, le câblage et l'habitat ne sont pas équivalents) et de manière très partielle par l'étude conduite en Côte-d'Or. Nous estimons que la gestion du risque éventuel lié aux EBF doit reposer sur une estimation et une caractérisation plus précise des expositions, chez l'adulte et surtout chez l'enfant, afin de préciser :

- la répartition des niveaux d'exposition ;
- les sources d'exposition (ouvrages électriques publics et privés et leurs caractéristiques, câblage des habitations, éclairage urbain) et leur importance relative dans l'exposition globale ;
- l'influence du type de résidence (urbaine, suburbaine, rurale, individuelle, collective) ;
- l'influence des autres paramètres pertinents recueillis lors de l'enquête qui accompagnera les mesures

Compte tenu de la diversité de l'habitat français et du fait que cette évaluation doit porter sur les personnes (mesures pendant 24 ou 48 h au moyen d'un dosimètre portable) en même temps que sur les lieux de vie, elle nécessitera un échantillon de personnes et des moyens importants. Il faudrait également prévoir d'apprecier la stabilité au cours du temps des expositions mesurées par la réPLICATION de certaines mesures (voir paragraphe 7.2). Une telle étude pourrait être, au moins en partie, financée par le gestionnaire du réseau de transport (RTE), le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) et les

producteurs d'électricité, et confiée à des organismes indépendants pour la réalisation pratique (mesures, enquête), l'exploitation des données et le pilotage global de l'étude.

Cette étude pourra servir de base pour étudier la faisabilité d'études complémentaires, nationales ou internationales visant à préciser le lien éventuel entre les leucémies de l'enfant et l'exposition aux EBF. Elle permettra également d'évaluer la faisabilité d'une surveillance spécifique des personnes exposées à un niveau d'exposition moyenne élevé, par exemple au moyen de registres de pathologies malignes.

7.2 Connaissance de la population exposée

7.2.1 *Connaissance de la population à proximité des lignes HT*

À défaut de pouvoir identifier l'ensemble des enfants exposés en France au-delà de 0,3 µT, il est au moins possible d'identifier la population exposée aux lignes HT.

Le tracé des lignes est en effet facilement accessible et il devrait être relativement simple d'estimer la population de moins de 15 ans vivant à leur proche voisinage, en collaboration avec RTE et EDF. Les lignes devront être caractérisées sur la carte de façon à distinguer les lignes aériennes des lignes souterraines, et parmi elles les voltages de 63, 90, 250 et 400 KV. D'autres paramètres devront être considérés comme le nombre de phases, la période de fonctionnement, le débit des lignes.

Comme indiqué plus haut (paragraphe 7.1), il est indispensable qu'un travail rigoureux de métrologie soit conduit, *a priori* par RTE et EDF, pour estimer sur une période suffisamment longue les champs moyens au voisinage des différentes configurations de lignes HT. Les déterminants des variations de champs à proximité des lignes (types de pylônes, types de câbles, période de l'année, type de constructions...) devront aussi être décrits. Pour cela, il faut prévoir ces variables dans le plan d'échantillonnage pour pouvoir ensuite extrapoler les niveaux d'exposition mesurés à l'ensemble de la population vivant à proximité des lignes.

7.2.2 *Population exposée à d'autres sources que les lignes HT*

Comme pour l'évaluation de l'exposition au voisinage des lignes, il est nécessaire de mener des campagnes métrologiques permettant de préciser quelles configurations de réseau électrique sont susceptibles d'exposer à 0,3 µT ou plus, qu'il s'agisse des postes de transformation des lignes de distribution et de l'éclairage public, des câblages des parties communes des immeubles, des câblages internes aux habitations ou de l'électroménager, ou des voies ferrées. Une campagne de mesures dans les habitations (chambres à coucher) et des mesures d'exposition individuelle par dosimètre portable sont nécessaires pour accroître notre connaissance de la population exposée. Ces mesures peuvent être précédées avec avantage d'une enquête sur les habitudes de câblage dans le bâtiment (lignes 4 fils, câbles en façade, ...), notamment dans les PME de sous-traitance d'EDF pour les installations locales et les formations d'électriciens. Là encore, il faut un échantillonnage adapté pour que les résultats soient généralisables à l'ensemble de la population.

7.3 Surveillance de la population d'enfants exposés

Dans l'état actuel de nos connaissances sur les expositions, on ne peut pas envisager de surveiller le risque de leucémie de l'ensemble de la population de moins de 15 ans exposée à des niveaux élevés de champs magnétiques que l'on ne peut pas identifier précisément. Cependant, bien que les connaissances épidémiologiques n'en soient qu'à suggérer un lien possible entre l'exposition au dessus de 0,3 µT, et non à considérer ce lien comme probable ou certain, on peut déjà mettre en place une surveillance partielle en s'appuyant sur des structures existantes.

Dans le Registre National des Leucémies et Lymphomes de l'Enfant (INSERM U170), les cas de leucémie sont actuellement localisés à l'échelle de leur commune d'habitation. Ils devraient prochainement être localisés plus finement. Une localisation des cas au voisinage des lignes haute tension devient donc envisageable à relativement peu de frais, puisque le registre existe déjà, et elle devrait permettre à terme d'estimer l'incidence des leucémies à proximité des lignes. Par ailleurs, il faudra acquérir des connaissances complémentaires sur les autres sources d'exposition susceptibles d'induire des expositions à niveau élevé (voir 7.2) avant de pouvoir envisager une surveillance de l'ensemble de la population exposée.

Le dispositif de surveillance pourrait permettre de suivre les sujets vivant à moins de 200 mètres des lignes. Le choix des méthodes et des modalités de cette surveillance sera nécessairement multidisciplinaire. Elle sera au minimum basée sur une collaboration du Registre National des Leucémies et Lymphomes de l'Enfant avec RTE et EDF de façon à optimiser l'évaluation des niveaux d'exposition et l'identification des catégories de sujets exposés.

En l'absence de chiffres précis, on ne peut pas calculer avec certitude la puissance de ce dispositif de surveillance. Elle est nécessairement faible à l'échelle de la France prise isolément, car le nombre de cas supplémentaires attendus dans la population surveillée est très faible. La puissance statistique est meilleure à l'échelle européenne, qui deviendra probablement, à terme, l'échelle de surveillance d'un certain nombre d'expositions environnementales.

Les données disponibles nous permettent d'envisager plusieurs hypothèses de fréquence de l'exposition dans la population des enfants de moins de 15 ans (10 449 339 enfants au recensement de 1999). Les niveaux définis par Ahlbom et al (0,4 µT) et Greenland et al (0,3 µT) déterminaient des fractions d'exposés respectivement de 0,6 % et de 1,8 %. Parmi les enfants exposés à ces niveaux ou au-delà, la proportion d'enfants vivant à proximité des lignes n'est pas toujours indiquée, et la notion même de proximité varie, de moins de 50 m à moins de 400 m selon les études. Si l'on se base sur la méta-analyse de Greenland et al, 1,8 % de la population serait exposé à une exposition de 0,3 µT ou plus, soupçonnée de pouvoir augmenter le risque de leucémie d'un facteur 1,7. On peut estimer la taille de la population infantile résidant à proximité des lignes et qui serait suivie : si l'on fait l'hypothèse que 10% des enfants exposés résident à proximité des lignes et que ces enfants représentent eux-mêmes 10 % de la totalité des enfants résidant sous les lignes, la population à suivre est un peu inférieure à 200 000 enfants (188 100). Dans cette population, toujours d'après la méta-analyse de Greenland et al, on attendrait un supplément de 0,5 cas en 1 an et de 16 cas en 15 ans du fait des champs magnétiques, si l'on admet leur responsabilité causale dans le risque de leucémie. À l'échelle de 3 pays de la taille de la France, le

nombre de cas supplémentaires serait de 24 cas en 15 ans. Sur 15 ans, le dispositif serait assez puissant pour mettre en évidence une augmentation de risque de 20 % à l'échelle de la France et de 12 % à l'échelle de trois pays de la taille de la France. Il est possible que les données disponibles en France permettent d'emblée de reconstituer 15 ans de suivi dans la mesure où le Registre National des Leucémies et des Lymphomes de l'Enfant a suffisamment d'ancienneté. Dans le tableau 7.1 dans ce chapitre, nous avons envisagé plus de scénarios, avec des valeurs de 10 % et de 20 % pour la proportion d'enfants vivant à proximité des lignes à haute tension parmi les sujets et des valeurs de 5 %, 10 %, 15 % pour la proportion d'enfants exposés au-delà de 0,3 ou 0,4 µT parmi ceux qui résident à proximité des lignes. La surveillance devrait permettre de détecter une augmentation du nombre de cas de 10% à 45% selon la distribution effective de la population, et selon que l'on se base sur l'une ou l'autre des méta-analyses. Elle aurait au moins l'avantage d'écartier des risques plus élevés et d'aider à préciser l'exposition de la population.

Tableau 7.1 : Conditions de puissance, en termes de puissance ($1-\beta$) et de SIR (Standardized Incidence Ratio) minimum détectable, d'un suivi de la population de moins de 15 ans résidant auprès des lignes à haute tension, selon différentes hypothèses sur les fréquences d'exposition. La colonne encadrée d'un trait double est celle qui correspond au cas développé en 7.3.

	Hypothèse : RR=2 pour 0,4 µT ou plus						Hypothèse : RR=1,7 pour 0,3 µT ou plus					
Population pédiatrique totale	10 449 339						10 449 339					
Fraction d'exposés de la population	0,60%						1,80%					
Nombre d'enfants supposés exposés	62 696						188 088					
Fraction d'enfant résidant à proximité des lignes parmi les exposés	10%			20%			10%			20%		
Nombre d'enfants supposés exposés et résidant près des lignes	6 270			12 539			18 809			37 618		
Fraction d'exposés parmi les enfants résidant à proximité des lignes	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Population suivie :	125 392	62 696	41 797	250 784	125 392	83 595	376 176	188 088	125 392	752 352	376 176	250 784
Enfant résidant à proximité des lignes	5,0%	10,0%	15,0%	5,0%	10,0%	15,0%	3,4%	6,7%	10,1%	3,4%	6,7%	10,1%
% d'augmentation de cas attendu	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,1	1,1	1,1
Nombre de cas supplémentaires en 1 an	1,05	1,10	1,15	1,05	1,10	1,15	1,03	1,07	1,10	1,03	1,07	1,10
SIR correspondant	12,1%	13,1%	13,8%	13,1%	14,5%	15,7%	12,5%	13,7%	14,6%	13,7%	15,4%	16,8%
Puissance pour 1 an de suivi	2,13	2,72	3,23	1,76	2,13	2,44	1,60	1,89	2,13	1,41	1,60	1,76
SIR minimum détectable à 1 an de suivi (1-$\beta=80\%$; $\alpha=10\%$)	4,0	4,0	4,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	16,1	16,1	16,1
Nombre de cas supplémentaires en 15 ans	20,0%	25,3%	29,7%	25,6%	34,1%	41,1%	22,2%	28,8%	34,3%	29,0%	39,7%	48,4%
Puissance pour 15 ans de suivi	1,25	1,36	1,45	1,17	1,25	1,31	1,14	1,20	1,25	1,10	1,14	1,17
Nombre de cas supplémentaires en 15 ans et 3 pays de la taille de la France	12,0	12,0	12,0	24,0	24,0	24,0	24,1	24,1	24,1	48,2	48,2	48,2
Puissance pour 15 ans de suivi et 3 pays de la taille de la France	30,3%	41,6%	50,5%	42,1%	59,1%	70,8%	34,8%	48,7%	59,4%	49,2%	68,7%	80,7%
SIR minimum détectable à 15 ans de suivi et 3 pays (1-$\beta=80\%$; $\alpha=10\%$)	1,14	1,20	1,25	1,10	1,14	1,17	1,08	1,12	1,14	1,06	1,08	1,10

7.4 Approches de précaution

Dans le contexte de l'exposition des populations aux champs électromagnétiques et des craintes associées (lignes HT, téléphonie mobile, etc.), de multiples propositions ont été faites pour mettre en œuvre des approches de précaution, en particulier en invoquant le « Principe de Précaution ». Ce principe a été effectivement invoqué et mis en œuvre à travers des réglementations nationales ou régionales pour les divers types d'expositions. Néanmoins, cette situation a augmenté la confusion dans l'opinion publique en raison des différences transfrontalières de valeurs limites d'exposition et des différentes appréciations du risque en résultant.

7.4.1 OMS

L'OMS a décidé d'abandonner la notion de Principe de Précaution, qui était mal définie et difficile à appliquer, pour construire celle de « Cadre de Précaution » qui permet une approche cohérente des risques. Ce texte est maintenant disponible sur le site de l'OMS.¹ Des « études de cas » sont en cours d'élaboration sur différents facteurs de l'environnement. C'est le cas des champs magnétiques EBF. Une première version de ce document est incluse en appendice B dans le document de l'OMS sur le cadre de précaution.

À partir de la classification du CIRC des champs magnétiques EBF comme cancérogène possible, l'OMS considère que la mise en œuvre de son cadre de précaution implique « une évaluation approfondie des mesures de précautions comportant des analyses détaillées de types coût-bénéfice et coût-efficacité ». L'incertitude sur la relation causale entre exposition et leucémie est reconnue ainsi que sur la nature du paramètre pertinent de quantification de l'exposition et sur l'étiologie. Prenant en compte ces incertitudes, l'OMS recommande de faire l'hypothèse qu'une réduction de l'exposition moyenne de la population réduirait le risque. Ceci exclut donc l'existence d'effets « fenêtre » mais reconnaît qu'une telle approche de réduction de l'exposition moyenne ne visera pas à coup sûr le paramètre pertinent de l'exposition.

Les différentes options sont passées en revue et les conclusions, provisoires, de l'OMS sont entre autres que :

- Les limites d'exposition devant être fondées sur la science, une réduction des limites autour de 0,4 µT n'est pas justifiée, car les effets sanitaires correspondant à ce niveau ne sont pas établis,
- Des changements d'ingénierie (y compris de méthode de mise à la terre) ne sont pas justifiables, sauf s'ils apportent d'autres gains en termes de sécurité par exemple et sont de faible coût,
- Les industriels fabricants d'appareils ménagers pourraient améliorer la conception de ces appareils pour diminuer leur émission,
- La recherche doit continuer pour aider à diminuer l'incertitude,
- L'information du public est hautement souhaitable.

¹ <http://www.who.int/peh-emf/en/>

7.4.2 ICNIRP

L'ICNIRP, qui vient de publier son rapport de revue sur les EBF (livre bleu cité plus haut), est en train de réviser ses recommandations de limites d'exposition, mais a déjà indiqué dans un communiqué qu'elle n'envisageait pas d'abaisser les limites d'exposition EBF sur la base des résultats de l'épidémiologie sur les leucémies de l'enfant.

Il est bon ici de rappeler comment les recommandations de limites de l'ICNIRP sont élaborées :

- À partir d'une analyse rigoureuse de la littérature scientifique, il a été défini que l'effet critique sanitaire dans cette gamme de fréquence est la stimulation des nerfs et muscles. Cette limite se situe autour de 100 mA/m^2 .
- Sur cette base et en tenant compte des incertitudes scientifiques, un facteur de réduction de 10 a été choisi pour obtenir la valeur de 10 mA/m^2 pour les travailleurs et, avec un facteur supplémentaire de 5, qui tient compte des incertitudes spécifiques des populations potentiellement plus sensibles (femmes enceintes, enfants, vieillards, malades), on aboutit à la limite ou restriction de base de 2 mA/m^2 .
- Enfin des niveaux d'exposition ont été calculés pour vérifier le respect des limites n'entraînant pas le dépassement des limites d'exposition. Ainsi, la valeur « public » du champ magnétique instantané est de $100 \mu\text{T}$ (correspondant à 2 mA/m^2 au maximum à l'intérieur de l'organisme).

Ce processus d'élaboration qui n'est pas toujours connu ou compris, est fondé sur la connaissance scientifique et c'est le désir (et le devoir) de l'OMS et de l'ICNIRP de voir les réglementations nationales ne pas s'éloigner des bases scientifiques afin de ne pas engendrer des surenchères politiques de réduction arbitraires des normes.

Il est clair de plus que les décisions politiques de gestion du risque doivent intégrer une analyse coût-bénéfice. Ceci a déjà été tenté pour le cas des champs magnétiques EBF. Ainsi, dans l'étude italienne de l'ANPA¹, citée plus haut, une analyse coût-bénéfice indiquait qu'une réduction des niveaux de champs à moins de $0,5 \mu\text{T}$ en Italie coûterait environ 20 milliards d'euros, pour un bénéfice hypothétique d'environ un cas excédentaire par an.²

7.4.3 Avis du groupe d'experts

En conclusion, à partir des connaissances actuelles sur les effets sanitaires des champs magnétiques EBF et sur l'exposition de la population, le groupe d'experts recommande la mise en œuvre d'une approche de précaution concernant non pas tant la population générale mais plutôt celle exposée aux niveaux les plus élevés (c'est-à-dire au-dessus de $0,3\text{-}0,4 \mu\text{T}$ environ). Il s'agit donc de mettre des moyens en œuvre pour :

- 1) Augmenter le niveau d'activité de recherche en France sur les effets biologiques pouvant être à la base de l'association entre champs magnétiques et leucémie,
- 2) Identifier les sources des expositions les plus élevées et les populations qui y sont exposées, et mettre en place les outils épidémiologiques permettant de surveiller les populations identifiées comme

¹ Agence nationale pour la protection de l'environnement (italienne)

² Curruro et al, 2001

exposées,

- 3) Examiner les moyens techniques permettant de réduire les niveaux élevés en réduisant l'émission ou en éloignant les personnes,
- 4) Effectuer une analyse coût-bénéfice à partir des résultats obtenus en 2) et 3).

7.5 Réglementation

Il n'existe pas à l'heure actuelle de réglementation française sur l'exposition aux champs magnétiques EBF. Il apparaît souhaitable au groupe d'experts que la transposition de la recommandation européenne de 1999 soit faite en droit français afin de procurer un cadre réglementaire et de l'harmoniser dans toute la gamme de fréquence de 0 à 300 GHz.

Le groupe note que l'application du décret¹ faisant suite aux problèmes de sécurité dus à la tempête de 1999, induit une diminution de l'exposition liée aux lignes haute-tension grâce à l'éloignement des habitations.

7.6 Perception et communication du risque

De multiples réunions publiques ont été organisées, en particulier en vue de l'installation ou de la modification de lignes haute-tension. En ces occasions, les médias se sont fait l'écho des craintes du public (information, brochure, etc.).

Au vu des craintes et incompréhensions manifestes observées lors de ces événements, il faudrait rédiger et distribuer de nouveaux documents destinés au public, pour informer sur les progrès des connaissances, la nature et l'amplitude des risques et les mesures prises pour les éviter ainsi que les approches de précaution conseillées.

Il reste à déterminer quelles sont les institutions les mieux habilitées à le faire de manière indépendante : ministères, instituts, agences sanitaires, sociétés savantes ou associations.

¹ Décret no 2004-835 du 19 août 2004 relatif aux servitudes d'utilité publique prévues par l'article 12 bis de la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie

8 Recommandations pour la recherche

Pour introduire les recommandations de recherche que le groupe d'experts propose, il est bon de rappeler qu'à la suite du rapport du CIRC, très peu de projets de recherche ont été initiés pour tirer au clair le fondement de l'association entre leucémie et champs magnétiques EBF. De fait, l'activité de recherche sur les effets des EBF est très réduite dans le monde en termes de financements et de publications. Pour remédier à cet état de choses, il faudrait susciter des programmes de recherche focalisés. Ces projets devraient apporter des éléments nouveaux nécessaires pour les évaluations au niveau international.

Une base de données de l'OMS, qui décrit les projets de recherche récemment terminés ou en cours, permet de situer l'effort de recherche national dans le contexte mondial.¹ Actuellement, l'OMS rédige un document de synthèse (EHC)² sur les champs EBF et l'ICNIRP révise ses recommandations de limites d'exposition dans la même gamme de fréquence. Il est important que des éléments nouveaux soient apportés à la connaissance des effets biologiques et sanitaires pour être pris en compte dans ces mises à jour.

La France doit contribuer de manière significative à l'effort de recherche, notamment dans le cadre de programmes nationaux et européens. Les programmes portant sur les EBF dans le 5^{ème} PCRD sont terminés et aucun n'est en cours ni prévu dans le 6^{ème} PCRD. Pourtant l'action coordonnée en cours, EMF-NET³, chargée de recommander des actions futures pourrait aider à préparer un programme de recherche dans le cadre du 7^{ème} PCRD.

8.1 Épidémiologie

La recherche française est restée à l'écart de l'effort épidémiologique international mené depuis une vingtaine d'années sur les risques associés aux champs magnétiques EBF d'origine résidentielle, alors qu'avec l'une des plus grandes populations d'Europe, et l'existence d'un Registre National des Leucémies et Lymphomes de l'Enfant, la France est bien équipée pour apporter sa part d'information à la communauté scientifique. En accord avec l'expertise du CIRC, il ne paraît pas prioritaire de mettre en place de nouvelles études épidémiologiques tant que les connaissances sur les effets biologiques des champs et la métrologie n'auront pas évolué (voir chapitres 3 et 5). On peut cependant tirer profit, à des fins de recherche, d'un dispositif de surveillance des populations exposées. La base de données ainsi constituée en France, même si elle est nécessairement limitée dans un premier temps aux expositions situées au voisinage des lignes, facilitera la mise en route rapide d'investigations si elles s'avèrent à nouveau indiquées. Par ailleurs, il devient faisable à faible coût de décrire la population surveillée d'un point de vue socio-démographique et environnemental, pour tenter d'identifier les possibles facteurs liés au risque de leucémie et associés à la présence de champs magnétiques EBF. C'est en effet parmi ces facteurs que l'on peut vraisemblablement identifier les facteurs de confusion et les sources de biais de

¹ www.who.int/peh-emf/

² Environment Health Criteria

³ www.emf-net.isb.cnr.it/

sélection invoqués dans les rapports du NRPB, de l'ICNIRP et du CIRC.

8.2 Expérimentation en laboratoire

8.2.1 Thèmes de recherche

Les recommandations de l'OMS ont été établies en 1998 mais pas remises à jour de façon approfondie depuis, tandis qu'elles l'ont été pour les radiofréquences.

À partir de ces recommandations, de celles présentes dans les différents rapports cités et après analyse des priorités et des possibilités, les axes suivants devraient être considérés en priorité :

- pour élucider l'association entre leucémie et champ magnétique, l'utilisation d'un modèle animal de leucémie est hautement souhaitable. Or, ces modèles existent et devraient être mis en œuvre avec des expositions fortes (autour de 100 µT) avant de rechercher un seuil des effets éventuels à plus bas niveaux.
- quelques études de réplication devraient être entreprises afin de clarifier le débat. Ainsi les résultats d'une équipe autrichienne¹ sur les effets génotoxiques de champs EBF intermittents doivent être vérifiés.
- pendant plusieurs années, il a été question d'étudier l'influence des champs transitoires sans que cette recommandation ait été suivie d'effets. Actuellement, c'est plutôt l'intermittence qui paraît être le facteur important. Il s'agit donc de réaliser quelques expérimentations clefs pour identifier si ce facteur est déterminant dans l'obtention des effets biologiques.
- enfin, il est certain que l'étape suivante de la recherche devra porter sur les synergies des champs avec d'autres facteurs de l'environnement (UV, polluants chimiques, etc.).

8.2.2 Moyens nécessaires

En France, le financement public de la recherche sur les effets biologiques des EBF est faible par rapport à des pays tels que la Grande-Bretagne, l'Italie ou les Etats-Unis (le programme américain RAPID a mobilisé 65 M\$ sur cinq ans). L'essentiel de l'effort de recherche français est soutenu par EDF et RTE (environ 1,2 M€/an depuis dix ans).

Les experts sollicités dans le cadre de ce rapport ont mis en commun leur expérience issue de diverses origines. Ils ont le sentiment qu'il n'existe pas en France une masse critique suffisante pour maîtriser de façon satisfaisante tous les aspects liés à la problématique des champs EBF.

Au niveau national, il existe deux laboratoires spécialisés sur les champs électromagnétiques :

- le laboratoire CNRS de Physique des Interactions Ondes-Matière (PIOM) à Talence près de Bordeaux (Directeur : Bernard Veyret – équipe de 15 personnes). Cette équipe travaille sur l'expérimentation animale et cellulaires, et ne peut pas couvrir tous les aspects, toutes les technologies, tous les modèles, toutes les pathologies, tous les systèmes.
- le laboratoire de neurotoxicologie de l'INERIS qui avec une petite équipe ne couvre que les effets

¹ Ivancsits et al, 2002 & 2003

de la téléphonie mobile sur le système nerveux du rat (Directeur : René de Seze - équipe permanente de 3 personnes + personnel commun à d'autres activités).

D'autres équipes françaises ont une activité ponctuelle dans ce domaine. Il serait important de développer la coordination entre ces équipes et de mettre en place des actions incitatives pour permettre à toutes ces équipes d'aborder de nouveaux sujets.

9 Résumé du rapport

Ce rapport est consacré à une mise au point des connaissances sur les effets présumés et très médiatisés en santé humaine, des champs magnétiques générés par le transport et la distribution de l'électricité aux fréquences de 50-60 hertz (extrêmement basse fréquence, EBF).

La mission du groupe d'experts réunis pour cette étude est précisée dans une lettre du Professeur Abenhaïm, Directeur général de la Santé, datée de fin 2001, qui souhaitait voir se dégager d'éventuelles propositions d'évolution des recommandations internationales et de la réglementation française. Il demandait également au groupe d'experts de faire des propositions en vue de quantifier le risque, d'établir une éventuelle surveillance et des programmes de recherche, ainsi que des outils pour communiquer en direction du public.

Le rapport analyse les documents fondamentaux de référence, les documents les plus récents publiés en France et à l'étranger et les articles les plus pertinents sur le sujet. Les principaux acteurs français du transport de l'électricité (EDF et RTE) et du bâtiment (CSTB) ont été consultés.

Au vu des données disponibles dans la littérature internationale, il est apparu aux experts que seule la problématique des champs magnétiques et de la leucémie de l'enfant méritait une étude approfondie.

Description des phénomènes physiques

En l'état actuel des connaissances, aucun mécanisme biophysique établi ne peut rendre compte d'effets biologiques des champs magnétiques EBF inférieurs à 50-100 µT. En particulier, aucun des phénomènes physiques impliqués dans les interactions des champs EBF avec la matière vivante n'est en mesure d'expliquer le lien entre exposition aux champs magnétiques EBF et leucémie de l'enfant suggéré par les études épidémiologiques.

Données sur les expositions du public

Les sources d'exposition du public peuvent être des équipements collectifs (lignes électriques, alimentation des trains, métros ou tramways, alimentation des immeubles collectifs, éclairage public) ou privés (câblage et éclairage intérieurs des habitations, appareils domestiques, couvertures chauffantes). La connaissance de la contribution de ces différentes sources est aujourd'hui insuffisante et la métrologie de l'exposition reste un maillon faible des études épidémiologiques. On dispose aujourd'hui de méthodes fiables pour mesurer l'exposition d'une population aux champs magnétiques EBF, mais on reste dans l'incertitude quant à l'historique des expositions qu'il serait pourtant nécessaire de quantifier pour évaluer des effets sanitaires à long terme.

La répartition et l'origine de l'exposition aux champs magnétiques ont été recueillies dans différents pays mais pas encore en France. Ces données permettent d'estimer la proportion de la population française exposée à plus de 0,3 µT à environ 1,8 %. La part des expositions dues aux lignes à haute tension pourrait être de l'ordre de 10 à 20%.

Etudes en laboratoire

Au niveau cellulaire, il n'y a actuellement aucune preuve que l'exposition aux champs EBF puisse affecter les processus biologiques, du moins au dessous de 100 µT, et en particulier dans des modèles

liés au cancer. Deux processus méritent cependant une attention soutenue : la synergie entre champs magnétiques EBF et facteurs chimiques et physiques, et l'influence du potentiel génétique sur la réponse aux champs EBF.

Chez l'animal, il est admis aujourd'hui que l'exposition aux champs magnétiques EBF ne constitue pas un initiateur du processus cancérigène. Pour ce qui est de la phase de promotion, il existe néanmoins des observations non cohérentes qui indiquent que ces champs pourraient affecter la croissance de certaines tumeurs mammaires dans chez certaines souches de rat.

Chez l'homme, l'ensemble des données disponibles est en faveur de l'absence d'effets sanitaires dus à l'exposition.

Etudes épidémiologiques

La première étude épidémiologique ayant fait suspecter l'existence d'un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques et le cancer de l'enfant a été publiée en 1979. De nombreuses études épidémiologiques réalisées depuis ont cherché à documenter ce lien, en essayant de contrôler les difficultés méthodologiques (sélection non biaisée des sujets, taille suffisante des échantillons, méthode pertinente d'évaluation des expositions aux champs magnétiques, prise en compte de facteurs de confusion). Bien que ces problèmes méthodologiques ne puissent être complètement résolus, ces études constituent à présent une base solide, que résument bien les mété-analyses d'Ahlbom et al. et de Greenland et al., publiées en 2000. Elles indiquent la possibilité d'un doublement du risque de leucémie chez les enfants exposés à plus de 0.3 µT ou 0.4 µT, ces niveaux d'exposition correspondant à des niveaux moyens sur la vie entière des sujets, estimés d'après différentes méthodes. Les données n'évoquent ni relation dose-effet, ni seuil d'effet, ni tranche d'âge à risque particulier. C'est sur la base de ces données épidémiologiques exclusivement que le CIRC, en 2002, a classé les champs magnétiques EBF dans la catégorie 2B des cancérigènes possibles, ce qui traduit bien à la fois l'importance du faisceau de présomption en faveur de la cancérogénicité des champs et l'absence de certitude sur leur implication causale dans le risque de leucémie. Dans l'état actuel des connaissances, une nouvelle étude épidémiologique aurait peu de chances d'apporter des éléments décisifs permettant de trancher définitivement.

Les autres pathologies cancéreuses survenant chez l'enfant ou l'adulte n'ont pas été décrites ici en détail. Globalement les éléments en faveur d'un lien entre ces pathologies et les champs magnétiques sont extrêmement faibles. De même, il n'y a pas aujourd'hui d'argument évoquant un rôle cancérogène des champs électriques.

Quantification du risque

La quantification du risque soulève plusieurs problèmes : d'une part, elle suppose que l'association entre exposition aux champs magnétiques EBF et risque de leucémie de l'enfant est causale, ce qui n'est pas établi ; d'autre part, elle s'appuie nécessairement sur une évaluation des populations exposées, évaluation non disponible en France aujourd'hui.

La France compte chaque année environ 450 nouveaux cas de leucémie chez l'enfant de moins de 15 ans. Si l'exposition à 0,3 µT ou plus s'avérait être un facteur de risque de leucémie chez l'enfant, et si ce niveau d'exposition concernait un peu moins de 2% des enfants de moins de 15 ans, 2 à 12 de ces cas pourraient être imputables chaque année en France aux champs magnétiques EBF.

Recommandations de gestion du risque

À partir des connaissances actuelles sur les effets sanitaires des champs magnétiques EBF et sur l'exposition de la population, le groupe d'experts recommande la mise en œuvre d'une approche de précaution concernant non pas tant la population générale que la fraction de la population exposée aux niveaux les plus élevés (c'est-à-dire au-dessus de 0,3-0,4 µT environ). Il s'agit donc de mettre des moyens en œuvre pour : 1) Augmenter le niveau d'activité de recherche en France sur les effets biologiques pouvant être à la base de l'association entre champs magnétiques EBF et leucémie. 2) Identifier les sources des expositions les plus élevées et les populations qui y sont exposées, et mettre en place les outils épidémiologiques permettant de surveiller les populations identifiées comme exposées. 3) Examiner les moyens techniques permettant de réduire les niveaux élevés, en réduisant l'émission ou en éloignant les personnes, 4) Effectuer des analyses coût-bénéfice et coût-efficacité à partir des résultats obtenus en 2) et 3).

En l'absence de réglementation française sur l'exposition aux champs magnétiques EBF, il apparaît souhaitable au groupe d'experts que la transposition de la recommandation européenne de 1999 soit faite en droit français afin de procurer un cadre réglementaire et de l'harmoniser dans toute la gamme de fréquence de 0 à 300 GHz.

Enfin, il est nécessaire de mettre à jour les documents d'information (progrès des connaissances, nature et amplitude des risques connus ou soupçonnés, mesures de protection le cas échéant) et de les diffuser.

Recommandations de recherche

La France doit contribuer de manière significative à l'effort de recherche, notamment dans le cadre de programmes nationaux et européens.

Il ne paraît pas prioritaire de mettre en place de nouvelles études épidémiologiques tant que les connaissances sur les effets biologiques des champs et la métrologie n'auront pas évolué. On peut cependant tirer profit, à des fins de recherche, d'un dispositif de surveillance des populations exposées.

Sur le plan expérimental, les axes suivants devraient être considérés en priorité : 1) l'utilisation d'un modèle animal de leucémie, 2) la réplication de certains travaux encore largement débattus, 3) le rôle de l'intermittence de l'exposition dans l'obtention des effets biologiques, 4) les synergies des champs avec d'autres facteurs de l'environnement (UV, polluants chimiques, etc.).

Enfin, il paraît essentiel de développer la coordination entre les rares équipes de recherche françaises impliquées dans l'étude des risques sanitaires des champs magnétiques et de mettre en place des actions incitatives pour élargir le domaine traité et diversifier les approches.

10 Bibliographie

- Adair et al. (2003) Weak electric fields in the body. in Radiation Protection Dosimetry. A McLinlay et M Repacholi Eds. Vol 106.
- Ahlbom A, Day N, Feychtung M, Roman E, Skinner J, Dockerty J et al. (2000) A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br J Cancer, 83:692-698.
- Ahlbom IC, Cardis E, Green A, Linet M, Savitz D, Swerdlow A. (2001) Review of the epidemiologic literature on EMF and Health. Environ Health Perspect 109 Suppl 6:911-933.
- Babbitt JT, Kharazi AI, Taylor JM, Bonds CB, Mirell SG, Frumkin E, Zhuang D, Hahn TJ (2000) Hematopoietic neoplasia in C57BL/6 mice exposed to split-dose ionizing radiation and circularly polarized 60 Hz magnetic fields. Carcinogenesis, 21 : 1379–1389.
- Beniashvili DS, Bilanishvili VG, Menabde MZ, Gupta D, Anisimov VN (1993) Modifying effect of light and electromagnetic fields on development of mammary tumors induced by n-nitrosomethylurea in female rats. Vopr Onkol, 39 : 52-60.
- Bernard N, Chretien P, Tanguy ML, Lambrozo J, Guillosson JJ, and Nafziger J. (2004) Study of the potential leukemogenic effects of 50 Hz magnetic fields and their harmonics in a rat lymphoblastic leukemia. Annual meeting of BEMS, Washington DC, USA.
- Boorman, G.A., McCormick, D.L., Findlay, J.C., Hailey, J.R., Gauger, J.R., Johnson, T.R., Kovatch, R.M., Sills, R.C. & Haseman, J.K. (1999) Chronic toxicity/oncogenicity evaluation of 60 Hz (power frequency) magnetic fields in F344/N rats. Toxicol Pathol. 27 : 267–278.
- Boorman GA, McCormick DL, Ward JM, Haseman JK, Sills RC. (2000a) Magnetic fields and mammary cancer in rodents: a critical review and evaluation of published literature. Radiat Res. 153:617-626.
- Boorman GA, Rafferty CN, Ward JM, Sills RC. (2000b) Leukemia and lymphoma incidence in rodents exposed to low-frequency magnetic fields. Radiat Res. 153:627-636.
- Brain JD, Kavet R, McCormick DL, Poole C, Silverman LB, Smith TJ, Valberg PA, Van Etten RA, Weaver JC (2003) Childhood Leukemia: Electric and Magnetic Fields as Possible Risk Factors. Environmental Health Perspectives 111 : 962-970.
- Cho YH, Chung HW (2003). The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (EBF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a)pyrene. Toxicol Lett 143:37-44.
- CIRC/IARC (2002) Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (EBF) electric and magnetic fields. Lyon, France: IARC press.
- Clinard F, Deschamps F, Milan C, Bouvier AM, Carli PM, Moutet JP, Faivre J, Bonithon-Kopp C, Hillon P (2004) Évaluation de l'exposition aux champs magnétiques dans les habitations situées à proximité des lignes de transport de l'électricité en France. Environnement, Risques et Santé. 3 :111-118.
- Crasson M (2003) 50–60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review.

- Curcuruto S, Elia L, Andreuccetti D, Vecchia P, Martuzzi M, D'Amore M (2001) Valutazione tecnico economica degli interventi di risanamento ambientale delle linee elettriche del sistema nazionale ANPA rapporti3/2001.
- Czyz J, Nikolova T, Schuderer J, Kuster N, Wobus AM. (2004). Non-thermal effects of power-line magnetic fields (50 Hz) on gene expression levels of pluripotent embryonic stem cells-the role of tumour suppressor p53. *Mutat Res* 557: 63-74.
- Decat G., Peeters E., Smolders R. Bossuyt M. (2003) Tijdsreeks en GIS-model om de blootstelling van de bevolking aan het 50 Hz magnetisch veld gegenereerd door bovengrondse hoogspanningslijnen in Vlaanderen in kaart brengen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2003/05, Vito, Belgique.
- Desjobert H, Hillion J, Adolphe M, Averlant G, Nafziger J. (1995) Effects of 50 Hz magnetic fields on C-myc transcript levels in nonsynchronized and synchronized human cells. *Bioelectromagnetics*. 16 : 277-283.
- Dockerty JD, Elwood JM, Skegg DC, Herbison GP. (1998) Electromagnetic field exposures and childhood cancers in New Zealand. *Cancer Causes Control*; 9 : 299-309.
- Doll RC et al. (2001) EBF electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an advisory group on non-ionising radiation. *Documents of the NRPB* 12:3-179 ISBN 0-85951-456-0.
- Durand DM, Jefferys JGR et al. (2003) Weak electric fields in the body Radiation Protection Dosimetry. A McLinlay et M Repacholi Eds. Vol 106.
- Ekström T, Mild KH, Holmberg B. (1998) Mammary tumours in Sprague-Dawley rats after initiation with DMBA followed by exposure to 50 Hz electromagnetic fields in a promotional scheme. *Cancer Lett.* 16 :107-111.
- Eskelinen T, Keinanen J, Salonen H, Juutilainen J. (2002) Use of spot measurements for assessing residential EBF magnetic field exposure: a validity study. *Bioelectromagnetics*. 23:173-176.
- Espinosa J, Lagroye I, Haro E, Veyret B (2004) Effect of 50-Hz magnetic fields on the 5-HT1B serotonergic receptor: a replication study. Annual Meeting of the BEMS, Washington DC USA.
- Fedrowitz M, Kamino K, Löscher W. (2004) Significant differences in the effects of magnetic field exposure on 7,12-Dimethylbenz(a)anthracene-Induced mammary carcinogenesis in two substrains of Sprague-Dawley rats. *Cancer Res*, 64: 243-251.
- Feychting M, Ahlbom A. (1993) Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *Am J Epidemiol*; 138:467-481.
- Friedman DR, Hatch EE, Tarone R, Kaune WT, Kleinerman RA, Wacholder S, Boice JD Jr, Linet MS (1996) Childhood exposure to magnetic fields: Residential area measurements compared to personal dosimetry. *Epidemiology*, 7 : 151-155.
- Fulton JP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E. (1980) Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am J Epidemiol*; 111: 292-296.
- Green LM, Miller AB, Agnew DA, Greenberg ML, Li J, Villeneuve PJ et al. (1999) Childhood leukemia and personal monitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada. *Cancer Causes Control*. 10:233-243.

-
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. (2000) A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group. *Epidemiology*. 11:624-634.
- Gurney JG, Mueller BA, Davis S, Schwartz SM, Stevens RG, Kopecky KJ. (1996) Childhood brain tumor occurrence in relation to residential power line configurations, electric heating sources, and electric appliance use. *Am J Epidemiol*; 143:120-128.
- Health Council of the Netherlands (2003) EBF Electromagnetic Fields Committee. *Electromagnetic Fields: Annual Update 2003*.
- Health Council of the Netherlands (2004) Publication no. 2004/01.¹
- Hyun YJ, Cho YS, Kim YS (2004) Exposure of School Children To Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Korea. Asia-Pacific EMF Conference on Electromagnetic Fields, Research, Health Effects, and Standards Harmonization. Bangkok, Thaïlande.
- ICNIRP (2004) Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz). R Matthes, A McKinlay, J Bernhardt Eds.
- Ivancsits S, Diem E, Pilger A, Rudiger HW, Jahn O. (2002). Induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields in human diploid fibroblasts. *Mutat Res* 519 :1-13.
- Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rudiger HW. (2003a). Age-related effects on induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to electromagnetic fields. *Mech Ageing Dev* 124:847-850.
- Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rudiger HW. (2003b). Intermittent extremely low frequency electromagnetic fields cause DNA damage in a dose-dependent way. *Int Arch Occup Environ Health* 76:431-436.
- Kaune WT, Savitz DA (1994) Simplification of the Wertheimer-Leeper wire code. *Bioelectromagnetics*;15:275-282.
- Kavet R, Zaffanella LE, Pearson RL, and Dallapiazza J (2004) Association of residential magnetic fields with contact voltage. *Bioelectromagnetics* 25:530-536.
- Kharazi AI, Babbitt JT, Hahn TJ. (1999) Primary brain tumor incidence in mice exposed to split-dose ionizing radiation and circularly polarized 60 Hz magnetic fields. *Cancer Lett.* 147:149-156.
- Lacy-Hulbert A, Wilkins RC, Hesketh TR, Metcalfe JC. (1995) No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Radiat Res*.144:9-17.
- Linet MS, Hatch EE, Kleinerman RA, Robison LL, Kaune WT, Friedman DR et al. (1997) Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *N Engl J Med*. 337:1-7.
- Lindgren M, Gustavsson M, Hamnerius Y, Galt S (2001) EBF Magnetic fields in a city environment. *Bioelectromagnetics* 22:87-90.
- London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng TC, Peters JM. (1991) Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol*; 134:923-937.
- Maddock BJ (1992) Overhead line design in relation to electric and magnetic field limits. *Power Eng J.* 6:217-224.

¹ www.healthcouncil.nl

-
- Madec F, Billaudel B, Charlet de Sauvage R, Sartor P, Veyret B (2003) Effects of EBF and static magnetic fields on calcium oscillations in Islets of Langerhans. *Bioelectrochemistry*, 60 : 73-80.
- Mandeville, R., Franco, E., Sidrac-Ghali, S., Paris-Nadon, L., Rocheleau, N. Mercier, G., Désy, M. & Gaboury, L. (1997) Evaluation of the potential carcinogenicity of 60 Hz linear sinusoidal continuous-wave magnetic fields in Fischer F344 rats. *FASEB J.*, 11 : 1127–1136.
- Mangiacasale R, Tritarelli A, Sciamanna I, Cannone M, Lavia P, Barberis MC, Lorenzini R, Cundari E. (2001) Normal and cancer-prone human cells respond differently to extremely-low frequency magnetic fields. *FEBS Lett* 487:397-403.
- Massot, O., B. Grimaldi, et al. (2000). Magnetic field desensitizes 5-HT(1B) receptor in brain: pharmacological and functional studies. *Brain Res* 858: 143-150.
- McBride ML, Gallagher RP, Theriault G, Armstrong BG, Tamaro S, Spinelli JJ et al. (1999) Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. *Am J Epidemiol*; 149:831-842.
- McCann J, Kavet R, Rafferty CN. (2000) Assessing the potential carcinogenic activity of magnetic fields using animal models. *Environ Health Perspect*. 108 Suppl 1:79-100.
- McCormick DL, Boorman GA, Findlay JC, Hailey JR, Johnson TR, Gauger JR, Pletcher JM, Sills RC, Haseman JK (1999) Chronic toxicity/oncogenicity evaluation of 60 Hz (power frequency) magnetic fields in B6C3F₁ mice. *Toxicol. Pathol.*, 27 : 279–285.
- McCurdy AL, Wijnberg L, Loomis D, Savitz D, Nylander-French LA (2001) Exposure to extremely low frequency magnetic fields among working women and homemakers. *Ann Occup Hyg*. 45:643-650.
- Michaelis J, Schüz J, Meinert R, Menger M, Grigat JP, Kaatsch P et al. (1997) Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes Control*. 8:167-174.
- Miyakoshi J, Ohtsu S, Shibata T, Takebe H. (1996). Exposure to magnetic field (5 mt at 60 Hz) does not affect cell growth and c-myc gene expression. *J Radiat Res (Tokyo)* 37:185-191.
- Morehouse CA, Owen RD. (2000) Exposure of daudi cells to low-frequency magnetic fields does not elevate Myc steady-State mRNA Levels. *Radiat Res* 153:663-669.
- Myers A, Clayden AD, Cartwright RA, Cartwright SC. (1990) Childhood cancer and overhead powerlines - a case control study. *Br J Cancer*; 62:1008-1014.
- Neutra, RR, DelPizzo, V, Lee, GL (2002) « *An evaluation of the possible risks from electric and magnetic fields (emfs) from power lines, internal wiring, electrical occupations, and appliances.* » California EMF program.¹
- NIEHS² programme « RAPID » (1999) *Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields* (NIH Publication No. 99-4493)³, Cincinnati, OH, USA.
- NRPB (2001) ELF electromagnetic fields and the risk of cancer⁴,

¹ www.dhs.ca.gov/ehib/emf/RiskEvaluation/riskeval.html

² National Institute of Environmental Health Sciences

³ www.niehs.nih.gov/emfrapid/home.htm

⁴ Doll, 2001

-
- NRPB (2004) *Proposal for limiting exposure to EMF (0-300 GHz)*¹.
- Olsen JH, Nielsen A, Schulgen G. (1993) Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *Br Med J*; 307:891-895.
- Owen RD. (1998). Myc mRNA Abundance Is Unchanged In Subcultures Of HL60 Cells Exposed To Power-Line Frequency Magnetic Fields. *Radiat Res* 150:23-30.
- Pasquini R, Villarini M, Scassellati Sforzolini G, Fatigoni C, Moretti M. (2003) Micronucleus induction in cells co-exposed in vitro to 50 Hz magnetic field and benzene, 1,4-benzenediol (hydroquinone) or 1,2,4-benzenetriol. *Toxicol In Vitro* 17:581-586.
- Petrini C, Polichetti A, Vecchia P, and Lagorio S (2001) Assessment of exposure to 50 Hz magnetic fields power lines in Italy. 5th EBBA Congress, Helsinki.
- Preston-Martin S, Navidi W, Thomas D, Lee PJ, Bowman J, Pogoda J. (1996) Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol.* 143:105-119.
- Reilly JP (1998) *Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology*. New York: Springer-Verlag, 568 pp. (ISBN 0-387-98407-0).
- Saffer JD, Thurston SJ. (1995) Short exposures to 60 Hz magnetic fields do not alter MYC expression in HL60 or daudi cells. *Radiat Res* 144:18-25.
- Savitz DA, Watchel H, Barnes FA, John EM, Tvrlik JG. (1988) Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am J Epidemiol*; 128:21-38.
- Schoenfeld ER, Henderson K, O'Leary E, Grimson R, Kaune W, Leske MC (1999) Magnetic field exposure assessment: a comparison of various methods. *Bioelectromagnetics*. 20:487-496.
- Selmaoui B, Lambrozo J, Touitou Y (1997). Endocrine functions in young men exposed for one night to a 50-Hz magnetic field. A circadian study of pituitary, thyroid and adrenocortical hormones. *Life Sci*, 61: 473-486.
- Stronati L, Testa A, Villani P, Marino C, Lovisolo GA, Conti D, Russo F, Fresegna AM, Cordelli E. (2004) Absence of genotoxicity in human blood cells exposed to 50 Hz magnetic fields as assessed by comet assay, chromosome aberration, micronucleus, and sister chromatid exchange analyses. *Bioelectromagnetics* 25:41-48.
- Svedenstål BM, Johanson KJ, Hansson Mild K (1999a). DNA damage induced in brain cells of CBA mice exposed to magnetic fields. *In Vivo*, 13: 551-552.
- Svedenstål BM., KJ Johanson Mattsson MO, Paulsson LE (1999b). DNA damage, cell kinetics and ODC activities studied in CBA mice exposed to electromagnetic fields generated by transmission lines. *In Vivo* 13: 507-513.
- Thun-Battersby S, Mevissen M, Löscher W (1999) Exposure of Sprague Dawley rats to a 50-hertz, 100-microtesla magnetic field for 27 weeks facilitates mammary tumorigenesis in the 7,12-dimethylbenz[a]-anthracene model of breast cancer. *Cancer Res* 59: 3627-3633.
- Tian F, Nakahara T, Yoshida M, Honda N, Hirose H, Miyakoshi J. (2002) Exposure to power frequency magnetic fields suppresses X-ray-induced apoptosis transiently in Ku80-deficient xrs5 cells.

¹ www.nrp.org

Biochem Biophys Res Commun 292:355-361.

Tomenius L. (1986) 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. Bioelectromagnetics; 7:191-207.

Tynes T, Haldorsen T. (1997) Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. Am J Epidemiol 145:219-226.

UK CCS (1999) Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators. Lancet; 354:1925-1931.

Valberg, P. A., R. Kavet, et al. (1997). Can low-level 50/60 Hz electric and magnetic fields cause biological effects? . Radiat Res 148 : 2-21.

Verheyen GR, Pauwels G, Verschaeve L, Schoeters G. (2003) Effect of coexposure to 50 Hz magnetic fields and an aneugen on human lymphocytes, determined by the cytokinesis block micronucleus assay. Bioelectromagnetics 24 :160-164.

Verkasalo PK, Pukkala E, Hongisto MY, Valjus JE, Jarvinen P, Heikkila KV et al. (1993) Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. Br Med J. 307:895-899.

Vistnes AI, Ramberg GB, Bjornevik LR, Tynes T, Haldorsen T. (1997) Exposure of children to residential magnetic fields in Norway: is proximity to power lines an adequate predictor of exposure? Bioelectromagnetics. 18:47-57.

Wartenberg D. (2001a) The potential impact of bias in studies of residential exposure to magnetic fields and childhood leukemia. Bioelectromagnetics.;Suppl 5:S 32-47.. Erratum in: Bioelectromagnetics. 2004 May;25:319.

Wartenberg D. (2001b) Residential EMF exposure and childhood leukemia: meta-analysis and population attributable risk. Bioelectromagnetics. 2001;Suppl 5:S 86-104.

Wei L-X, Goodman R, Henderson A. (1990) Changes in levels of C-Myc and histone H2b following exposure of cells to low-frequency sinusoidal electromagnetic fields: evidence for a window effect. Bioelectromagnetics 11:269-272.

Wertheimer N, Leeper E. (1979) Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol. 109:273-284.

Yasui, M., Kikuchi, T., Ogawa, M., Otaka, Y., Tsuchitani, M. & Iwata, H. (1997) Carcinogenicity test of 50 Hz sinusoidal magnetic fields in rats. Bioelectromagnetics, 18 : 531–540.

11 Annexe : Composition du groupe d'experts

André Aurengo dirige le service de Médecine nucléaire du groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière à Paris. Professeur de Biophysique, il est ancien élève de l'Ecole Polytechnique, ancien Interne des hôpitaux de Paris, Docteur en médecine et docteur es Sciences. Il est président de la section de radioprotection du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, vice-président de la Société Française de Radioprotection (SFRP), membre du Conseil scientifique de l'IRSN et président du Comité d'éthique du Conseil d'Administration d'EDF où il siège comme représentant du Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires rurales.

Jacqueline CLAVEL est épidémiologiste à l'Unité 170 de l'INSERM, Unité de Recherches Epidémiologiques et Statistiques sur l'Environnement et la Santé, où elle est spécialisée en épidémiologie des cancers. Directeur de Recherche à l'INSERM, elle est titulaire d'un Doctorat en Médecine et d'un Doctorat de Sciences en Epidémiologie. Elle est responsable du Registre National des Leucémies et Lymphomes de l'Enfant qui assure la surveillance nationale de l'incidence des hémopathies malignes de l'enfant depuis le 1er janvier 1990. Elle dirige une équipe dont les travaux sont consacrés à la recherche des facteurs de risque environnementaux et génétiques des cancers de l'enfant.

René de SEZE est médecin, spécialisé en radiologie, titulaire du DEA "Instrumentation et mesure" et d'un Doctorat d'Université en Sciences de la Vie, sur les effets des micro-ondes de faible puissance sur le système immunitaire de la souris. Il a été Assistant Hospitalo-Universitaire au CHU de Nîmes dans le Service de Médecine Nucléaire et Biophysique Médicale du professeur Miro, puis Médecin Attaché en Biophysique Médicale et en Radiologie. Directeur de Recherches à l'INERIS, sa thématique de recherche est l'étude des interaction des champs électromagnétiques avec les systèmes biologiques et en particulier les effets sur la santé des radiotéléphones cellulaires. Il est président du bureau de la section Rayonnements Non Ionisants de la Société Française de Radio Protection (SFRP/RNI), président de l'Association Européenne de Bioélectromagnétisme (EBEA), membre du comité de Biologie associé à la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP) et membre de la Société de BioElectroMagnétisme (BEMS).

Pascal GUÉNEL est épidémiologiste à l'Unité 170 de l'INSERM, Unité de Recherches Epidémiologiques et Statistiques sur l'Environnement et la Santé, où il est spécialisé en épidémiologie des cancers. Il a notamment été responsable dans le passé de la partie française d'une étude sur les effets cancérogènes des expositions professionnelles à des champs électromagnétiques EBF réalisée conjointement en France et au Canada. Il a participé en tant qu'expert à la monographie du CIRC sur les radiations non ionisantes. Il dirige actuellement une équipe de recherche dont les travaux portent sur les facteurs de risque environnementaux des cancers, en particulier les cancers du sein et les cancers de la thyroïde.

Jacques Joussot-Dubien est Membre correspondant de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'Université Bordeaux. Après avoir fondé en 1970 un Laboratoire de photochimie, il crée en 1992, avec Bernard Veyret, le Laboratoire Physique des Interactions Ondes-Matière à l'ENSCPB¹ qu'il dirigeait à l'époque. La partie bioélectromagnétisme est affiliée à L'École Pratique des hautes Études. Directeur de la Recherche au Ministère de la Recherche en 1986, il est élu Vice Président du Conseil supérieur de la Recherche et de la Technologie en 1994. Il participe, en 2001, au groupe de travail « Champs électromagnétiques » du CSTEE à Bruxelles. Il est élu, en 1999, Président du bureau de la section Rayonnements Non Ionisant de la Société Française de Radio-Protection. Il est co-auteur avec Annette Duchêne du livre « Les effets biologiques des rayonnements non-ionisants ».

Bernard VEYRET est ingénieur physicien ESPCI, Docteur ès Sciences, directeur de recherche CNRS au laboratoire de Physique des Interactions Ondes-Matières (PIOM), à l'ENSCPB. Il est directeur du Laboratoire de Bioélectromagnétisme de l'École Pratique des Hautes Études. Il effectue des recherches sur les effets biologiques des champs électromagnétiques depuis 1985. Il est membre de la Commission de l'ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) et président de la Commission K de l'URSI (Union Radio Scientifique Internationale).

¹ Ecole nationale supérieure de Chimie et Physique de Bordeaux