

16 RESUME ET RECOMMANDATIONS RELATIVES AUX ETUDES A MENER

La présente monographie des critères d'hygiène de l'environnement porte sur les effets éventuels sur la santé d'une exposition à des champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence (EBF). On y examine les caractéristiques physiques des champs EBF ainsi que les sources d'exposition et le mesurage des champs. Toutefois, ses principaux objectifs sont d'examiner la littérature scientifique sur les effets biologiques d'une exposition aux champs EBF afin de pouvoir évaluer les risques pour la santé associés à l'exposition à ces champs et d'utiliser cette évaluation du risque sanitaire pour formuler des recommandations relatives aux programmes de protection sanitaire à l'intention des autorités nationales.

Les fréquences qui nous occupent sont situées au-dessus de 0 Hz et jusqu'à 100 kHz. La majorité des études a porté sur les effets des champs magnétiques à la fréquence des réseaux (50 ou 60 Hz), quelques études seulement portant sur les champs électriques à ces mêmes fréquences. En outre, un certain nombre d'études a été réalisé sur les champs magnétiques de très basse fréquence (VLF, 3–30 kHz), liés aux champs magnétiques à gradient commuté utilisés dans l'imagerie par résonance magnétique et aux champs VLF plus faibles, émis par les terminaux à écran cathodique et les postes de télévision.

Ce document récapitule les principales conclusions et recommandations de chaque section ainsi que les conclusions générales du processus d'évaluation des risques sanitaires. Les termes utilisés dans cette monographie pour indiquer le "poids de la preuve" en faveur d'un effet donné sur la santé sont les suivants. Les éléments d'appréciation sont "limités" lorsqu'ils ne se rapportent qu'à une seule étude ou lorsqu'il reste des questions sans réponse concernant la conception, la conduite ou l'interprétation d'un certain nombre d'études. On dit que les éléments d'appréciation sont "insuffisants" lorsque les études ne peuvent être interprétées comme montrant la présence ou l'absence d'un effet du fait d'insuffisances importantes sur le plan qualitatif ou quantitatif, ou lorsqu'aucune donnée n'est disponible.

On a également recensé des lacunes importantes dans les connaissances et on a résumé dans la section intitulée "Recommandations de recherche" les études nécessaires pour les combler.

16.1 Résumé

16.1.1 Sources, mesurage et expositions

Les champs électriques et magnétiques existent partout où de l'électricité est produite, transmise ou distribuée dans des lignes ou des câbles électriques, ou utilisée dans des appareils électriques. Depuis que l'électricité fait partie intégrante de notre mode de vie moderne, ces champs sont omniprésents dans notre environnement.

L'intensité du champ électrique se mesure en volts par mètre ($V\ m^{-1}$) ou en kilovolts par mètre ($kV\ m^{-1}$) et l'induction magnétique en teslas (T), ou plus communément en milliteslas (mT) ou en microteslas (μT).

Dans les habitations, l'exposition aux champs magnétiques à la fréquence du réseau ne montre pas de variations spectaculaires dans le monde. La moyenne géométrique du champ magnétique dans les habitations se situe entre 0,025 et 0,07 μT en Europe et entre 0,055 et 0,11 μT aux Etats-Unis. Les valeurs moyennes du champ électrique dans les habitations sont de l'ordre de plusieurs dizaines de volts par mètre. Au voisinage de certains appareils domestiques, les valeurs instantanées du champ magnétique peuvent atteindre quelques centaines de microteslas. A proximité des lignes électriques à haute tension, les champs magnétiques atteignent près de 20 μT et les champs électriques jusqu'à plusieurs milliers de volts par mètre.

Peu d'enfants subissent, là où ils habitent, des expositions à des champs magnétiques de 50 ou 60 Hz dont la moyenne dans le temps est supérieure aux niveaux associés avec une incidence accrue de leucémie infantile (voir section 16.1.10). Près de 1 à 4% d'entre eux ont des expositions moyennes supérieures à 0,3 μT et seuls 1 à 2% des expositions médianes supérieures à 0,4 μT .

L'exposition professionnelle, bien qu'elle soit principalement due à des champs à la fréquence du réseau, peut également comporter l'exposition à d'autres fréquences. Les expositions moyennes au champ magnétique sur les lieux de travail se sont avérées plus élevées au sein des "professions liées à l'électricité" que dans les autres, telles que par exemple le travail de bureau. Elles sont comprises entre 0,4 et 0,6 μT pour les électriciens et les ingénieurs en électricité et autour de 1,0 μT pour les agents travaillant sur les lignes électriques, les expositions les plus élevées concernant les soudeurs, les conducteurs de trains et les opérateurs de machines à coudre (plus de 3 μT). Les expositions maximales aux champs magnétiques sur les lieux de travail peuvent atteindre près de 10 mT et sont invariablement associées à la présence de conducteurs transportant des courants forts. Dans le secteur de l'alimentation électrique, les agents peuvent être exposés à des champs électriques atteignant 30 $kV\ m^{-1}$.

16.1.2 Champs électriques et magnétiques dans l'organisme

L'exposition à des champs électriques et magnétiques EBF externes induit des champs et des courants électriques dans l'organisme. La dosimétrie décrit le rapport entre le champ externe et les champs électriques et la densité de courant induits dans l'organisme, ou d'autres paramètres associés à l'exposition à ces champs. Le champ électrique et la densité de courant induits localement présentent un intérêt particulier parce qu'ils sont en rapport avec la stimulation des tissus excitables tels que nerfs et muscles.

Le corps de l'homme et des animaux perturbe sensiblement la distribution spatiale d'un champ électrique EBF. Aux fréquences basses, le corps est un bon conducteur et les lignes du champ perturbé à l'extérieur de l'organisme sont presque perpendiculaires à la surface du corps. Des charges

oscillantes sont induites à la surface de l'organisme exposé et ce sont elles qui produisent des courants dans l'organisme. Les principales caractéristiques de la dosimétrie concernant l'exposition de l'homme aux champs électriques EBF sont les suivantes:

- Le champ électrique à l'intérieur de l'organisme est normalement cinq ou six fois plus faible que le champ électrique externe.
- Lorsque le champ vertical est la cause principale de l'exposition, la direction dominante des champs induits est également verticale.
- Pour un champ électrique externe donné, les champs induits les plus forts le sont dans le corps humain en contact parfait avec le sol par l'intermédiaire des pieds (mise à la terre électrique) et les champs les plus faibles dans le corps isolé du sol ("espace libre").
- Le courant total circulant dans un organisme en contact parfait avec le sol est déterminé par la taille et la forme de l'organisme (notamment la posture), plutôt que par la conductivité des tissus.
- La distribution des courants induits dans les divers organes et tissus est déterminée par la conductivité de ces tissus et organes.
- La distribution d'un champ électrique induit est également fonction des conductivités, mais moins que celle du courant induit.
- Il existe également un phénomène indépendant dans lequel le courant est produit dans l'organisme du fait d'un contact avec un objet conducteur situé dans un champ électrique.

Concernant les champs magnétiques, la perméabilité des tissus est la même que celle de l'air, de sorte que le champ dans les tissus est le même que le champ extérieur. Le corps de l'homme et des animaux ne perturbe pas sensiblement ce champ. La principale interaction des champs magnétiques est l'induction, suivant la loi de Faraday, de champs électriques et des densités de courant associées dans les tissus conducteurs. Les principales caractéristiques de la dosimétrie concernant l'exposition de l'homme aux champs magnétiques EBF sont les suivantes:

- Le champ et le courant électrique induit dépendent de l'orientation du champ extérieur. Les champs induits dans l'organisme dans son ensemble sont plus grands lorsque le champ est aligné de l'avant vers l'arrière du corps, mais, pour certains organes, les valeurs les plus élevées s'observent lorsque le champ est appliqué de côté.
- Les champs électriques les plus faibles sont induits par un champ magnétique orienté le long de l'axe vertical du corps.
- Pour une intensité et une orientation donnée du champ magnétique, l'intensité des champs électriques induits dans un organisme augmentent avec sa taille.

- La distribution du champ électrique induit est modifiée par la conductivité des divers organes et tissus. Ceux-ci ont un effet limité sur la distribution de la densité du courant induit.

16.1.3 Mécanismes biophysiques

Il faut évaluer la plausibilité des divers mécanismes proposés d'interaction directe et indirecte des champs électriques et magnétiques EBF. En particulier, on veut savoir si on peut distinguer un "signal" produit dans un processus biologique par l'exposition à un champ, d'un bruit aléatoire intrinsèque, et si le mécanisme remet en question les principes et connaissances scientifiques actuels. De nombreux mécanismes ne deviennent plausibles qu'à des intensités de champs supérieures à un certain niveau. Néanmoins, l'absence de mécanismes plausibles répertoriés n'exclut pas la possibilité d'effets sur la santé même avec des champs très faibles, pour autant qu'on respecte les principes scientifiques fondamentaux.

Parmi les nombreux mécanismes proposés concernant l'interaction directe des champs avec le corps humain, il en est trois qui pourraient opérer à des intensités de champs plus faibles que les autres: les champs électriques induits dans les réseaux de neurones, les paires de radicaux libres et la présence de magnétite.

Les champs électriques induits dans les tissus par l'exposition à des champs électriques ou magnétiques EBF vont directement stimuler les fibres nerveuses simples myélinisées, et il s'agit d'un mécanisme plausible sur le plan biophysique, lorsque l'intensité du champ interne dépasse quelques $V\ m^{-1}$. Des champs beaucoup plus faibles peuvent modifier la transmission synaptique dans les réseaux neuronaux, au contraire des cellules isolées. Ce traitement du signal par les systèmes nerveux est communément employé par les organismes multicellulaires pour détecter les signaux environnementaux faibles. On a proposé une limite inférieure pour la discrimination par les réseaux nerveux de $1\ mV/m$, mais, d'après les données actuelles, des valeurs seuils situées autour de $10\ à\ 100\ mV\ m^{-1}$ semblent plus probables.

Le mécanisme des paires de radicaux libres est une modalité acceptée par laquelle les champs magnétiques peuvent modifier des types particuliers de réactions chimiques. On décrit généralement une augmentation de la concentration de radicaux libres sous exposition à des champs faibles et une diminution dans des champs intenses. On a observé ces augmentations dans des champs magnétiques de moins de $1\ mT$. Il semblerait qu'il y ait un lien entre ce mécanisme et le système de navigation des oiseaux au cours de leur migration. Pour des raisons théoriques et parce que les modifications produites par les champs magnétiques EBF et statiques sont analogues, on pense que des champs à la fréquence du réseau, bien moins intenses que le champ géomagnétique d'environ $50\ \mu T$, sont peu susceptibles d'être biologiquement importants.

Les cristaux de magnétite, qui sont de petits cristaux ferromagnétiques d'oxyde de fer de diverses formes, se retrouvent dans les tissus animaux et humains, même si c'est à l'état de traces. Comme les radicaux libres,

ils ont été reliés au système d'orientation et de navigation des animaux migrateurs, bien que la présence de quantités de magnétite à l'état de traces dans le cerveau humain ne lui confère pas d'aptitude à détecter le champ géomagnétique faible. Les calculs basés sur des hypothèses extrêmes laissent à penser que le seuil des effets des champs EBF sur les cristaux de magnétite se situe autour de $5 \mu\text{T}$.

Les autres interactions biophysiques directes des champs, comme la cassure des liaisons chimiques, les forces exercées sur les particules chargées et les divers mécanismes de "résonance" en bande étroite ne sont pas considérées comme apportant des explications plausibles aux interactions avec les champs rencontrés dans les environnements publics et professionnels.

Concernant les effets indirects, la charge électrique de surface induite par les champs électriques peut être perçue et entraîner des micro-chocs douloureux lorsque l'on touche un objet conducteur. Des courants de contact peuvent se produire lorsque, par exemple, de jeunes enfants touchent un robinet de baignoire dans certaines habitations. Cela produit de petits champs électriques, peut-être au-dessus du niveau de bruit de fond, dans la moelle osseuse. Toutefois, on ignore s'ils présentent un risque pour la santé.

Les lignes à haute tension produisent des nuages d'ions chargés électriquement par suite de la décharge par effet couronne. Il semble qu'elles pourraient accroître le dépôt des polluants de l'air sur la peau et dans les voies aériennes, avec d'éventuelles conséquences indésirables pour la santé. Toutefois, il semble peu probable que les ions de la couronne aient plus qu'un effet minime, si ce n'est nul, sur les risques sanitaires à long terme même chez les sujets les plus exposés.

Aucun des trois mécanismes directs évoqués ci-dessus ne semble constituer une cause plausible d'incidence accrue des maladies aux niveaux d'exposition généralement rencontrés. En réalité, ils ne deviendraient plausibles qu'à des intensités bien plus élevées, et les mécanismes indirects n'ont pour l'instant pas été suffisamment étudiés. Cette absence de mécanisme répertorié plausible n'exclut pas la possibilité d'effets indésirables pour la santé, mais crée véritablement un besoin de preuves plus solides venant de la biologie et de l'épidémiologie.

16.1.4 Neurocomportement

L'exposition à des champs électriques à la fréquence du réseau provoque des réponses biologiques bien définies, allant de la perception simple à la gêne, par biais des effets de la charge électrique de surface. Ces réponses dépendent de l'intensité du champ, des conditions environnementales ambiantes et de la sensibilité individuelle. Les seuils de perception directe chez 10% des volontaires se situent entre 2 et 20 kV m^{-1} , tandis que 5% trouvent que des valeurs de 15 à 20 kV m^{-1} sont gênantes. La décharge d'étincelles qu'émet une personne avec le sol est douloureuse pour 7% des volontaires dans un champ de 5 kV m^{-1} . Les seuils pour une décharge à partir d'un objet chargé à travers une personne ayant les pieds au sol dépend de la taille de l'objet et exigent par conséquent une évaluation précise.

Les champs magnétiques de forte intensité et pulsés peuvent stimuler les tissus nerveux périphériques ou centraux; de tels effets peuvent se produire au cours des examens d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et sont utilisés dans la stimulation magnétique transcrânienne. Le seuil de champ électrique nécessaire pour provoquer une stimulation nerveuse directe pourrait ne pas dépasser quelques volts par mètre (V/m). Ce seuil est probablement constant sur une gamme de fréquences située entre quelques hertz (Hz) et quelques kilohertz (kHz). Les personnes souffrant d'épilepsie ou prédisposées à cette maladie risquent d'être plus sensibles aux champs électriques EBF induits dans le système nerveux central (SNC). En outre, la sensibilité à la stimulation électrique du SNC semble très probablement être associée à des antécédents familiaux de crises convulsives et à l'utilisation d'antidépresseurs tricycliques, de neuroleptiques et autres médicaments qui abaissent le seuil convulsivogène.

La fonction de la rétine, qui fait partie du SNC, peut être modifiée par l'exposition à des champs magnétiques EBF beaucoup plus faibles que ceux qui provoquent une stimulation nerveuse directe. Une sensation d'éclairs lumineux, appelés phosphènes magnétiques ou magnéto-phosphènes, résulte de l'interaction du champ électrique induit avec les cellules de la rétine électriquement excitables. La valeur seuil du champ électrique induit dans le liquide extracellulaire de la rétine a été estimée entre 10 et 100 mV m⁻¹ à 20 Hz. Cependant, une incertitude considérable est attachée à ces valeurs.

Les données relatives à d'autres effets neuro-comportementaux observés dans les études sur des volontaires, par exemple les effets sur l'activité électrique du cerveau, la cognition, le sommeil, l'hypersensibilité et l'humeur sont moins nettes. En général, ces études ont été effectuées à des niveaux d'exposition situés au-dessous de ceux nécessaires pour provoquer les effets décrits ci-dessus et n'ont produit que des effets au mieux subtils et transitoires. Les conditions nécessaires pour déclencher ces réponses ne sont aujourd'hui pas bien connues. Il semblerait qu'il existe des effets sur le temps de réaction et sur une moindre précision observée dans l'exécution de certaines tâches cognitives, ce que viennent conforter les résultats d'études sur l'activité électrique générale du cerveau. Les études cherchant à déterminer si les champs magnétiques modifient la qualité du sommeil ont donné des résultats variables. Il est possible que cette variabilité puisse être attribuée en partie aux différences observées dans la conception de ces études.

Certaines personnes affirment être hypersensibles aux champs électromagnétiques en général. Toutefois, les données des études de provocation en double aveugle laissent à penser que les symptômes rapportés ne sont pas liés à l'exposition aux champs magnétiques EBF.

Il n'y a que des données contradictoires et peu concluantes indiquant que l'exposition aux champs électriques et magnétiques EBF puissent provoquer des symptômes dépressifs ou des suicides. Ainsi, ces données sont considérées comme insuffisantes.

Chez les animaux, la possibilité qu'une exposition aux champs EBF puisse modifier les fonctions neuro-comportementales a été explorée sous divers angles et pour toute une série de conditions d'exposition. Peu d'effets ont été établis avec certitude. Il y a des preuves convaincantes que les champs électriques à la fréquence du secteur peuvent être détectés par les animaux, très probablement par suite d'effets de charge de surface, et puissent provoquer une stimulation ou un stress bénin transitoire. Chez le rat, le seuil de détection se situe entre 3 et 13 kV m⁻¹. On a montré que des champs supérieurs à 50 kV m⁻¹ provoquaient une réaction d'aversion chez les rongeurs. Les autres modifications éventuelles dues aux champs sont moins bien définies; les études en laboratoire n'ont permis d'obtenir que des effets subtils et transitoires. Il semblerait que l'exposition aux champs magnétiques puisse moduler les fonctions des systèmes de neurotransmetteurs opioïdes et cholinergiques dans le cerveau, ce qui est conforté par les résultats d'études s'intéressant aux effets sur l'analgésie et sur l'acquisition et l'exécution de tâches liées à la mémoire spatiale.

16.1.5 Système neuroendocrinien

Les résultats des études effectuées chez des volontaires, ainsi que des études épidémiologiques en milieu résidentiel et professionnel, laissent à penser que le système neuroendocrinien n'est pas affecté par l'exposition à des champs électriques ou magnétiques à la fréquence du réseau. Cela vaut particulièrement pour les concentrations circulantes d'hormones spécifiques du système neuroendocrinien, notamment la mélatonine, libérée par l'épiphyse, et pour un certain nombre d'hormones impliquées dans le contrôle du métabolisme et de la physiologie de l'organisme libérées par l'hypophyse. On a parfois observé des différences infimes dans la chronologie de la libération de la mélatonine associées à certaines caractéristiques de l'exposition, mais ces résultats n'ont pas été uniformes. Il est très difficile d'éliminer certains facteurs de confusion dus à toutes sortes d'éléments environnementaux et du mode de vie qui pourraient également modifier les concentrations d'hormones. La plupart des études en laboratoire sur les effets de l'exposition aux EBF sur les concentrations nocturnes de mélatonine chez des volontaires ont montré qu'elle n'avait aucun effet lorsqu'on avait pris soin de neutraliser les éventuels facteurs de confusion.

Parmi les nombreuses études réalisées chez l'animal pour analyser les effets des champs électriques et magnétiques à la fréquence du réseau sur les concentrations pinéales et sériques de mélatonine chez le rat, certaines ont rapporté que l'exposition entraînait une suppression nocturne de la mélatonine. Les changements de concentration de mélatonine observés dans des études antérieures portant sur des expositions à des champs électriques allant jusqu'à 100 kV m⁻¹ n'ont pas pu être reproduits. Les résultats d'une série d'études plus récentes, qui ont montré que les champs magnétiques polarisés circulairement supprimaient les concentrations nocturnes de mélatonine, ont perdu du poids du fait de comparaisons inappropriées entre animaux exposés et témoins historiques. Les données d'autres expériences réalisées chez les rongeurs, couvrant des degrés d'intensité allant de quelques microteslas à

5 mT, ont été ambiguës, certains résultats montrant une dépression de la mélatonine et d'autres aucune modification. Chez les animaux se reproduisant à une saison déterminée, la preuve d'un effet de l'exposition à des champs à la fréquence du réseau sur les concentrations de mélatonine et sur l'état reproductif dépendant de la mélatonine est principalement négative. Aucun effet convaincant sur les concentrations de mélatonine n'a été observé dans une étude réalisée chez des primates non humains chroniquement exposés à des champs à la fréquence du réseau, bien qu'une étude préliminaire effectuée sur deux animaux ait rapporté une suppression de la mélatonine en réponse à une exposition irrégulière et intermittente.

Les effets de l'exposition à des champs EBF sur la production de mélatonine ou sa libération dans des épiphyses isolées ont été variables, bien que relativement peu d'études *in vitro* aient été effectuées. Les éléments de preuve indiquant que l'exposition aux EBF interfère avec l'action de la mélatonine sur les cellules de cancer du sein *in vitro* sont particulièrement intéressants. Toutefois, ce système souffre de l'inconvénient que les lignées cellulaires montrent fréquemment en culture une dérive génotypique et phénotypique qui peut empêcher leur transfert entre laboratoires.

Aucun effet répliquable n'a été observé sur les hormones liées au stress de l'axe hypophyso-surrénalien de toutes sortes d'espèces de mammifères, à l'exception possible d'un stress de courte durée faisant suite au début d'une exposition à un champ électrique EBF suffisamment intense pour être perçu. De la même façon, alors que peu d'études ont été effectuées, on a observé des effets principalement négatifs ou irréguliers au niveau des concentrations d'hormones de croissance et d'hormones participant au contrôle de l'activité métabolique, ou associées au contrôle de la reproduction et du développement sexuel.

Dans l'ensemble, ces données n'indiquent pas que les champs électriques et/ou magnétiques EBF modifient le système neuroendocrinien et ont des répercussions indésirables sur la santé humaine, et les éléments de preuve sont donc considérés comme insuffisants.

16.1.6 Troubles neurodégénératifs

L'hypothèse a été émise suivant laquelle l'exposition aux champs EBF serait associée à plusieurs maladies neurodégénératives. Concernant la maladie de Parkinson et la sclérose en plaques, le nombre d'études est faible et rien ne permet de penser qu'il y ait une association avec ces maladies.

Pour la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique (SLA), davantage d'études ont été publiées. Certains de ces rapports laissent à penser que les personnes ayant des professions dans le secteur de l'électricité pourraient avoir un risque accru de SLA. Jusqu'ici, aucun mécanisme biologique n'a été établi qui pourrait expliquer une telle association, la maladie ayant pu apparaître à cause de facteurs de confusion liés à ce type de professions, par exemple les chocs électriques. Dans l'ensemble, les éléments en faveur d'une association entre exposition aux EBF et SLA sont considérés comme insuffisants. Les quelques études portant sur l'association entre

exposition aux EBF et maladie d'Alzheimer ont donné des résultats variables. Toutefois, la meilleure qualité des études axées sur la morbidité par Alzheimer, plutôt que sur la mortalité, n'indique aucune association. Dans l'ensemble, les éléments en faveur d'une association entre l'exposition aux EBF et la maladie d'Alzheimer sont insuffisants.

16.1.7 Troubles cardio-vasculaires

Les études expérimentales sur l'exposition à court et long terme indiquent que si le choc électrique constitue un risque manifeste pour la santé, les autres effets cardio-vasculaires dangereux associés aux champs EBF ont peu de chances de se produire aux niveaux d'exposition communément rencontrés dans l'environnement naturel ou professionnel. Bien qu'on ait signalé dans la littérature diverses modifications cardio-vasculaires, la majorité des effets sont mineurs et les études n'ont pas donné de résultats homogènes. Aucune des études de la morbidité et de la mortalité des maladies cardio-vasculaires n'a montré d'association avec l'exposition, sauf une. Le fait de savoir s'il existe une association entre l'exposition et l'altération du contrôle autonome du cœur donne lieu à bien des conjectures. Dans l'ensemble, les éléments dont on dispose ne sont pas en faveur d'une association entre exposition aux EBF et maladie cardio-vasculaire.

16.1.8 Immunologie et hématologie

Les données concernant les effets des champs électriques ou magnétiques EBF sur des constituants du système immunitaire sont généralement peu homogènes. La plupart des populations cellulaires et marqueurs fonctionnels ne sont pas perturbés par l'exposition. Cependant, dans certaines études humaines réalisées avec des champs allant de 10 μ T à 2 mT, on a observé des modifications des cellules Natural Killer (NK), qui ont montré à la fois une augmentation et une diminution de leur nombre, et dans la numération leucocytaire totale qui a montré soit une absence de modification, soit une diminution du nombre de leucocytes. Dans des études réalisées chez l'animal, on a observé une diminution de l'activité des cellules NK chez la souris femelle, mais pas chez les mâles ni chez des rats des deux sexes. Les numérations leucocytaires ont également montré une certaine variabilité, avec des diminutions ou une absence de modification, rapportées dans différentes études. Les expositions auxquelles étaient soumis les animaux allaient de 2 μ T à 30 mT. La difficulté qu'il y a à interpréter les effets potentiels de ces données sur la santé est due aux grandes variations enregistrées dans les conditions d'exposition et environnementales, ainsi qu'au nombre relativement faible de sujets testés et à la vaste gamme des paramètres biologiques étudiés.

Il y a eu peu d'études sur les effets des champs magnétiques EBF sur le système hématologique. Dans les expériences évaluant les numérations leucocytaires différentielles, les expositions allaient de 2 μ T à 2 mT. Aucun effet constant de l'exposition aiguë aux champs magnétiques EBF ou aux champs magnétiques et électriques EBF combinés n'a été trouvé dans les études réalisées chez l'homme ou chez l'animal.

Par conséquent, d'une manière générale, les éléments en faveur d'effets des champs électriques ou magnétiques EBF sur les systèmes immunitaire et hématologique sont considérés comme insuffisants.

16.1.9 Reproduction et développement

Dans l'ensemble, les études épidémiologiques n'ont pas montré d'association entre leurs résultats dans le domaine de la reproduction de l'homme et l'exposition maternelle ou paternelle à des champs EBF. Il existe des éléments en faveur d'un risque accru de fausse-couche associé à l'exposition maternelle au champ magnétique, mais ils sont insuffisants.

Les effets d'expositions aux champs électriques EBF jusqu'à 150 kV m⁻¹ ont été évalués chez plusieurs espèces de mammifères, notamment dans des études sur l'exposition de grands groupes et sur plusieurs générations. Les résultats montrent systématiquement qu'il n'y a aucun effet indésirable sur le développement.

L'exposition de mammifères aux champs magnétiques EBF jusqu'à 20 mT n'entraîne pas de malformations externes, squelettiques ou viscérales grossières. Certaines études montrent une augmentation des anomalies mineures du squelette chez le rat et la souris. Ces variations sont relativement courantes dans les études de tératologie et sont souvent considérées comme sans signification biologique. Toutefois, des effets subtils des champs magnétiques sur le développement squelettique ne peuvent être écartés. Très peu d'études ont été publiées sur les effets sur la reproduction et il est impossible d'en tirer des conclusions.

Plusieurs études sur des modèles expérimentaux autres que mammifères (embryons de poulets, poissons, oursins et insectes) ont donné des résultats indiquant que les champs magnétiques EBF de l'ordre du microtesla peuvent perturber le début du développement. Mais les résultats de ces modèles expérimentaux ont moins de poids dans l'évaluation générale de la toxicité sur le développement que ceux des études correspondantes réalisées chez les mammifères.

Dans l'ensemble, les éléments en faveur d'effets sur le développement et la reproduction sont insuffisants.

16.1.10 Cancer

La classification du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC, IARC) des champs magnétiques EBF comme étant "peut-être cancérogènes pour l'homme" (IARC, 2002) est basée sur l'ensemble des données disponibles en 2001. L'examen de la littérature dans la présente monographie des critères d'hygiène de l'environnement est principalement axé sur des études publiées après l'analyse du CIRC.

Epidémiologie

La classification du CIRC a été fortement influencée par les associations observées dans les études épidémiologiques sur la leucémie infantile.

Le fait de classer ces éléments comme étant limités n'est pas modifié avec l'adjonction de deux études sur la leucémie infantile publiées après 2002. Depuis la publication de la monographie du CIRC, les éléments relatifs à d'autres cancers chez l'enfant restent insuffisants.

Un certain nombre de rapports a été publié à la suite de la monographie du CIRC concernant le risque de cancer du sein chez la femme adulte associé à l'exposition à des champs magnétiques EBF. Ces études sont de taille plus importante que les précédentes et moins susceptibles de présenter des biais et sont dans l'ensemble négatives. Elles ont donc considérablement affaibli les éléments en faveur d'une association entre exposition à des champs magnétiques EBF et risque de cancer du sein chez la femme et ne vont plus du tout dans le sens d'une telle association.

Dans le cas des tumeurs cérébrales et des leucémies chez l'adulte, les nouvelles études publiées après la monographie du CIRC ne modifient pas la conclusion selon laquelle les éléments en faveur d'une association entre champs magnétiques EBF et ces maladies restent insuffisants.

Pour les autres maladies et tous les autres cancers, les éléments restent insuffisants.

Etudes sur les animaux de laboratoire

Il n'existe actuellement aucun modèle animal approprié de la forme de leucémie infantile la plus commune, la leucémie aiguë lymphoblastique. Trois études indépendantes à grande échelle effectuées chez le rat n'ont fourni aucune preuve d'un effet des champs magnétiques EBF sur l'incidence des tumeurs mammaires spontanées. La plupart des études rapportent l'absence d'effets des champs magnétiques EBF sur la leucémie ou le lymphome dans les modèles murins. Plusieurs études à grande échelle et à long terme effectuées chez des rongeurs n'ont montré aucune augmentation systématique d'aucun type de cancer, notamment des tumeurs hématopoïétiques, mammaires, cérébrales et cutanées.

Un nombre non négligeable d'études a examiné les effets des champs magnétiques EBF sur les tumeurs mammaires induites chimiquement chez le rat. Elles ont obtenu des résultats variables qui peuvent être dus entièrement ou partiellement à des différences dans les protocoles expérimentaux, par exemple à l'utilisation de sous-souches particulières. La plupart des études sur les effets de l'exposition à des champs magnétiques EBF sur des modèles de leucémie/lymphome chimiquement induits ou induits par le rayonnement n'ont pas montré d'effets. Les études sur les lésions hépatiques précancéreuses, les tumeurs cutanées et cérébrales chimiquement induites ont en majorité rapporté l'absence d'effets. Une étude a signalé une accélération de la genèse tumorale cutanée induite par les UV après exposition à des champs magnétiques EBF.

Deux groupes ont signalé des niveaux accrus de lésions des brins d'ADN dans le tissu cérébral suite à une exposition *in vivo* à des champs magnétiques EBF. Toutefois, d'autres groupes, en utilisant toutes sortes de

modèles murins de génotoxicité, n'ont trouvé aucun signe d'effets génotoxiques. Les résultats des études s'intéressant aux effets non génotoxiques en rapport avec le cancer ne permettent pas de tirer des conclusions.

Dans l'ensemble, rien ne permet de penser que l'exposition à des champs magnétiques EBF seule puisse provoquer des tumeurs. Les éléments indiquant que l'exposition à un champ magnétique EBF peut favoriser le développement d'une tumeur lorsqu'elle est associée à des facteurs cancérogènes sont insuffisants.

Etudes in vitro

En général, les études sur les effets de l'exposition de cellules à un champ EBF ont montré qu'il n'y avait pas d'effets génotoxiques pour des intensités de champ inférieures à 50 mT. Il existe cependant une exception notable, à savoir les données d'études récentes signalant une altération de l'ADN à des champs aussi faibles que 35 μ T; cependant, ces études sont encore en cours d'évaluation et notre compréhension de ces résultats reste incomplète. Tout porte également à croire que les champs magnétiques EBF peuvent interagir avec des agents altérant d'ADN.

Il n'y a pas de preuve nette d'une activation des gènes associés au contrôle du cycle cellulaire par des champs magnétiques EBF. Cependant, il faut encore mener des études systématiques analysant la réponse de l'ensemble du génome.

De nombreuses autres études à l'échelle cellulaire, par exemple sur la prolifération cellulaire, le phénomène d'apoptose, le signal calcique et la transformation maligne, ont donné des résultats non homogènes ou ne permettant pas de tirer de conclusions.

Conclusion générale

Les nouvelles études réalisées chez l'homme, chez l'animal et in vitro et publiées depuis la monographie du CIRC en 2002 ne modifient en rien la classification générale des champs magnétiques EBF, considérés comme cancérogènes possibles pour l'homme.

16.1.11 Evaluation du risque pour la santé

D'après la Constitution de l'OMS, la santé est un état de bien-être physique, mental et social complet et pas simplement l'absence de maladie ou d'infirmité. Une évaluation du risque est un cadre conceptuel pour un examen structuré des informations utiles à l'estimation des résultats sur la santé ou l'environnement. L'évaluation du risque sanitaire peut être utilisée comme un élément de la gestion du risque qui englobe toutes les activités nécessaires pour parvenir à des décisions relatives au fait qu'une exposition exige ou non des mesures particulières et la mise en oeuvre de celles-ci.

Dans l'évaluation des risques pour la santé de l'homme, de solides données concernant l'homme, chaque fois qu'elles sont disponibles, sont généralement plus instructives que celles recueillies chez l'animal. Les

études chez l'animal et les études in vitro peuvent étayer les données des études chez l'homme, combler les lacunes laissées par les études chez l'homme, ou être utilisées pour prendre une décision relative aux risques lorsque les études chez l'homme sont insuffisantes ou absentes.

Toutes les études, qu'elles aient des résultats positifs ou négatifs (présence ou absence d'effets), doivent être évaluées et jugées pour elles-mêmes puis toutes ensemble à partir des données disponibles. Il est important de déterminer dans quelle mesure une série d'éléments modifie la probabilité pour qu'une exposition provoque un résultat. Les éléments de preuve de l'existence d'un effet sont généralement renforcés si les résultats de différents types d'études (épidémiologiques et expérimentales) laissent entrevoir la même conclusion et/ou lorsque de multiples études du même type donnent le même résultat.

Effets aigus

Des effets biologiques aigus ont été établis pour une exposition aux champs électriques et magnétiques EBF dans la gamme de fréquences allant jusqu'à 100 kHz, effets qui peuvent avoir des conséquences indésirables sur la santé. Par conséquent, des limites d'exposition sont nécessaires. Il existe des directives internationales qui traitent de cette question. L'observance de ces directives assure une protection suffisante contre les effets aigus.

Effets chroniques

Les données scientifiques laissant à penser que l'exposition quotidienne chronique à des champs magnétiques à la fréquence du réseau, de faible intensité (au-dessus de 0,3–0,4 μ T), constitue un risque pour la santé sont basées sur des études épidémiologiques mettant en évidence un profil homogène de risque de leucémie infantile accru. Les incertitudes de cette évaluation du risque incluent le biais de sélection des témoins et les erreurs de classification de l'exposition sur la relation entre champs magnétiques et leucémie infantile. En outre, pratiquement toutes les données de laboratoire et toutes les données mécanistiques ne vont pas dans le sens d'une association entre champs magnétiques EBF de faible intensité et modifications de fonctions biologiques ou de l'état sanitaire. Ainsi, tout bien considéré, les éléments de preuve ne sont pas suffisamment solides pour être considérés comme établissant un lien de causalité, mais le sont suffisamment pour rester préoccupants.

Bien que l'on n'ait pas pu établir une relation de cause à effet entre l'exposition à un champ magnétique EBF et la leucémie infantile, son effet possible sur la santé publique a été calculé en partant du principe de causalité de façon à fournir un élément potentiellement utile à la politique de santé. Toutefois, ces calculs dépendent fortement de la distribution de l'exposition et d'autres hypothèses et sont par conséquent très imprécis. En partant du principe que l'association est causale, le nombre de cas de leucémie infantile dans le monde qui pourrait être attribué à l'exposition peut, selon les estimations, se situer entre 100 et 2400 cas par an. Toutefois, cela ne représente que

0,2 à 4,9% de l'incidence annuelle totale des cas de leucémie, estimée à 49 000 dans le monde en 2000. Ainsi, dans le contexte mondial, l'impact sur la santé publique, pour autant qu'il y en ait, serait limité et incertain.

On a étudié un certain nombre d'autres maladies à la recherche d'une association éventuelle avec une exposition aux champs magnétiques EBF. Parmi elles figurent des cancers de l'enfant et de l'adulte, la dépression, le suicide, des dysfonctionnements de l'appareil reproducteur, des troubles du développement, des modifications immunologiques et des maladies neurologiques. Les données scientifiques en faveur d'un lien entre champs magnétiques EBF et l'une quelconque de ces maladies sont beaucoup plus ténues que pour la leucémie infantile et, dans certains cas (par exemple, s'agissant des maladies cardio-vasculaires ou du cancer du sein), elles sont suffisantes pour que l'on soit assuré que les champs magnétiques EBF ne provoquent pas ces maladies.

16.1.12 Mesures de protection

Il est essentiel de mettre en application des limites d'exposition de façon à se protéger des effets indésirables établis de l'exposition aux champs électriques et magnétiques EBF. Ces limites d'exposition doivent être basées sur un examen rigoureux de toutes les données scientifiques pertinentes.

Seuls des effets aigus ont été établis et il existe deux directives internationales relatives aux limites d'exposition (ICNIRP, 1998a; IEEE, 2002) destinées à protéger contre ces effets.

En même temps que ces effets aigus attestés, il existe des incertitudes concernant l'existence d'effets chroniques, à cause des éléments limités qui existent en faveur d'un lien entre exposition aux champs magnétiques EBF et leucémie infantile. Par conséquent, il est justifié de faire appel à des stratégies prudentes. Toutefois, il n'est pas recommandé de réduire les valeurs limites figurant dans les normes relatives à l'exposition jusqu'à un niveau arbitraire au nom du principe de précaution. De telles pratiques sapent les fondements scientifiques sur lesquels les limites sont basées et risquent de constituer une approche coûteuse, mais pas nécessairement efficace, d'assurer la protection.

La mise en œuvre d'autres types de mesures de précaution adaptées pour réduire l'exposition est raisonnable et justifiée. Toutefois, l'énergie électrique apporte des bienfaits évidents sur le plan sanitaire, social et économique et il ne faut pas que ces mesures les mettent en péril. Qui plus est, étant donné la faiblesse des éléments en faveur d'un lien entre exposition aux champs magnétiques EBF et leucémie infantile et les effets limités sur la santé publique si un tel lien existe, il est malaisé de déterminer les bienfaits qu'apporterait pour la santé une réduction de l'exposition. Ainsi, le coût des mesures de précaution doit être très bas. Le coût de la mise en œuvre des réductions d'exposition variera d'un pays à l'autre, ce qui fait qu'il est très difficile de formuler une recommandation générale visant à équilibrer les coûts face à un risque potentiel imputable aux champs EBF.

Compte tenu de ce qui précède, les recommandations qui suivent ont été formulées.

- Les responsables de l'élaboration des politiques sanitaires doivent établir des lignes directrices concernant l'exposition aux champs EBF à l'intention du grand public et des entreprises. Les directives internationales constituent la meilleure source d'orientation, aussi bien pour les niveaux d'exposition que pour les principes de l'évaluation scientifique des risques.
- Les responsables de l'élaboration des politiques doivent mettre en place un programme de protection contre les champs EBF comportant la mesure des champs de toutes origines pour veiller à ce que les limites d'exposition ne soient pas dépassées pour le grand public et lors d'expositions professionnelles.
- A condition de ne pas mettre en péril les bienfaits apportés sur le plan sanitaire, social et économique par l'énergie électrique, la mise en œuvre de mesures de précaution à très bas coût afin de réduire l'exposition est raisonnable et justifiée.
- Les responsables de l'élaboration des politiques sanitaires, les autorités locales et les fabricants doivent mettre en œuvre des mesures à très bas coût lorsqu'ils construisent de nouvelles installations et conçoivent un nouvel équipement, notamment de nouveaux appareils.
- Il faut envisager d'apporter des modifications aux pratiques de l'ingénierie afin de réduire l'exposition aux EBF des appareils ou dispositifs, à condition qu'elles se conjuguent avec d'autres avantages, par exemple une meilleure sécurité ou un coût faible ou nul.
- Lorsque l'on envisage d'apporter des changements aux sources EBF existantes, il faut étudier les possibilités de réduction du champ EBF en même temps que les aspects liés à la sécurité, à la fiabilité et au volet économique du projet.
- Les autorités locales doivent faire appliquer les réglementations relatives aux installations électriques afin de réduire les courants de terre non intentionnels lorsque l'on construit de nouvelles installations ou que l'on refait les installations existantes, tout en conservant la sécurité. Des mesures proactives visant à recenser les violations de ces règles ou les problèmes existants dans les installations électriques seraient coûteuses et peu susceptibles d'être justifiées.
- Les autorités nationales doivent mettre en œuvre une stratégie de communication efficace et ouverte pour permettre une prise de décision éclairée par toutes les parties prenantes ; celle-ci doit comprendre des informations sur la façon dont les personnes peuvent réduire leur propre exposition.

- Les autorités locales doivent améliorer la planification des installations émettrices de champs EBF, notamment en procédant à des consultations plus larges entre l'industrie, les pouvoirs publics locaux et les citoyens lorsqu'il s'agit d'implanter d'importantes sources EBF.
- Les pouvoirs publics et l'industrie doivent promouvoir des programmes de recherche visant à réduire l'incertitude des données scientifiques concernant les effets sanitaires de l'exposition aux champs EBF.

16.2 Recommandations en matière de recherche

La détermination des lacunes dans les connaissances relatives aux effets sanitaires possibles d'une exposition aux champs EBF constitue une part essentielle de cette évaluation du risque sanitaire. Il en a résulté les recommandations qui suivent relatives à la recherche à venir (résumées au Tableau 1).

La priorité des priorités pour la recherche est de s'intéresser aux fréquences intermédiaires, se situant communément entre 300 Hz et 100 kHz, étant donné l'actuel manque de données les concernant. Une très faible partie du corpus de connaissances nécessaires pour une évaluation du risque a été rassemblée et la plupart des études existantes ont donné des résultats variables, qui doivent être mieux étayés. Les normes générales de constitution d'une base de données sur les fréquences intermédiaires, qui soit suffisante pour l'évaluation du risque sanitaire, comprennent l'évaluation de l'exposition, des études épidémiologiques, des études sur l'homme en laboratoire et des études sur l'animal et sur les cellules (in vitro) (ICNIRP, 2003; ICNIRP, 2004; Litvak et al., 2002).

Pour toutes les études sur des volontaires, il est obligatoire que la recherche sur les sujets humains soit effectuée en conformité totale avec les principes éthiques, y compris les dispositions de la déclaration d'Helsinki (WMA, 2004).

Pour les études de laboratoire, on accordera la priorité aux réponses notifiées (i) pour lesquelles il y a au moins quelques éléments de réplication ou de confirmation, (ii) qui sont potentiellement en rapport avec la cancérogenèse (par exemple, la génotoxicité), (iii) qui sont suffisamment solides pour permettre une analyse mécanistique et (iv) qui se produisent dans des modèles mammifères ou humains.

16.2.1 Sources, mesurage et expositions

La caractérisation plus précise des habitations ayant une exposition élevée aux EBF dans différents pays, afin de déterminer la contribution relative des sources internes et externes, ainsi que l'influence des pratiques en matière d'installation électrique/de mise à la terre et autres caractéristiques des habitations, pourraient fournir des indications concernant une méthode pertinente de mesure de l'exposition pour les évaluations épidémiologiques. Mieux connaître l'exposition fœtale et infantile aux champs EBF en est une

composante importante, surtout s'agissant de l'exposition à un chauffage électrique par le sol ou aux transformateurs dans les immeubles.

On soupçonne que, dans certains cas d'exposition professionnelle, les limites d'exposition aux champs EBF des directives actuelles sont dépassées. Davantage d'informations sont nécessaires sur l'exposition professionnelle (y compris aux fréquences qui ne sont pas celles du réseau) liée par exemple à l'entretien des lignes sous tension, au travail à l'intérieur ou à proximité de l'entrefer des aimants d'IRM (et donc des champs EBF à gradient commuté) et aux réseaux de transport de l'électricité. De la même façon, des connaissances supplémentaires sont nécessaires concernant l'exposition du grand public qui pourrait approcher les limites des directives, notamment s'agissant de sources telles que les systèmes de sécurité, les systèmes de démagnétisation des bibliothèques, les appareils de cuisson par induction et de chauffage de l'eau.

L'exposition à des courants de contact a été proposée comme explication possible de l'association entre champs magnétiques EBF et leucémie infantile. Des recherches sont nécessaires dans des pays autres que les Etats-Unis d'Amérique afin d'évaluer la possibilité que les pratiques de mise à la terre et de plomberie utilisées dans les habitations donnent naissance à des courants de contact. Ces études auront la priorité dans les pays dans lesquels les résultats épidémiologiques concernant les EBF et la leucémie infantile sont significatifs.

16.2.2 Dosimétrie

Dans le passé, la plupart des recherches en laboratoire était fondée sur les courants électriques induits dans l'organisme, et la dosimétrie était ainsi axée sur cette quantité. Ce n'est que récemment que les travaux ont commencé à explorer les rapports entre exposition externe et champs électriques induits. Pour mieux comprendre les effets biologiques, on a besoin de davantage de données sur les champs électriques internes dans différentes conditions d'exposition.

Il faudrait procéder à une estimation des champs électriques internes dus à l'influence combinée des champs électriques et magnétiques externes dans différentes configurations. L'addition vectorielle des champs électriques et magnétiques qui sont sans relation de phase et variables dans l'espace est nécessaire pour déterminer les restrictions de base à respecter.

Très peu d'évaluations ont été effectuées sur des modèles précis de femme enceinte et de fœtus comportant une modélisation anatomique appropriée. Il est important d'estimer l'éventuelle induction de champs électriques chez le fœtus en relation avec le problème de la leucémie infantile car les expositions tant professionnelles que résidentielles de la mère sont importantes.

Il faut affiner encore les modèles micro-dosimétriques pour pouvoir tenir compte de l'architecture cellulaire des réseaux nerveux et autres systèmes infra-organiques complexes dont on sait qu'ils sont plus sensibles

aux effets induits par le champ électrique. Ce processus de modélisation doit également se pencher sur les influences s'exerçant sur les potentiels électriques de la membrane cellulaire et sur la libération des neurotransmetteurs.

16.2.3 Mécanismes biophysiques

Il y a trois sujets principaux pour lesquels il y a des limites évidentes à la compréhension que l'on a des mécanismes: les paires de radicaux libres, les particules magnétiques présentes dans l'organisme et le rapport signal/bruit dans les systèmes multicellulaires, tels que les réseaux neuronaux.

Le mécanisme des paires de radicaux libres est l'un des mécanismes d'interaction de faible intensité les plus plausibles, mais il reste à montrer qu'il est capable d'assurer la médiation d'effets importants dans le métabolisme et le fonctionnement cellulaire. Il est particulièrement important de comprendre quelle est la limite inférieure d'exposition à laquelle il agit, de façon à pouvoir estimer s'il pourrait ou non constituer un mécanisme pertinent de cancérogenèse. Etant donné les études récentes dans lesquelles les espèces oxygénées radicalaires ont été augmentées dans les cellules immunitaires exposées aux champs EBF, il est recommandé d'utiliser comme modèle cellulaire, pour l'analyse du potentiel de ce mécanisme des paires de radicaux libres, des cellules du système immunitaire qui produisent des espèces oxygénées radicalaires dans le cadre de leur réponse immunitaire.

Bien que la présence de particules magnétiques (cristaux de magnétite) dans le cerveau humain ne semble pas, d'après ce que l'on sait actuellement, conférer une sensibilité aux champs magnétiques EBF environnementaux, les approches théoriques et expérimentales à venir devraient déterminer si une telle sensibilité pourrait exister dans certaines conditions. En outre, toute modification du mécanisme des paires de radicaux libres évoqué ci-dessus, engendrée par la présence de magnétite, devrait être recherchée.

Il convient d'analyser de façon approfondie la mesure dans laquelle des mécanismes multicellulaires opèrent dans le cerveau pour augmenter le rapport signal/bruit, afin d'élaborer un cadre théorique permettant de quantifier le phénomène ou de déterminer ses limites. L'étude complémentaire du seuil et de la fréquence de réponse dans les réseaux neuronaux de l'hippocampe et d'autres parties du cerveau devrait être effectuée *in vitro*.

16.2.4 Neuro-comportement

Il est recommandé d'effectuer des études sur des volontaires en laboratoire sur les effets possibles sur le sommeil et sur la réalisation de tâches mentalement éprouvantes, au moyen d'approches méthodologiques harmonisées. Il faut préciser les réponses dose-réponse à des densités de flux magnétique supérieures à celles utilisées auparavant, et pour une gamme élargie de fréquences (c'est-à-dire dans la gamme des kilohertz).

Les études sur des adultes volontaires et sur les animaux laissent à penser que des effets cognitifs aigus peuvent se produire avec les expositions à court terme à des champs électriques ou magnétiques intenses. La caractérisation de ces effets est très importante pour l'élaboration de limites relatives à l'exposition, mais on manque de données précises concernant les effets dépendant du champ chez l'enfant. La mise en oeuvre d'études en laboratoire de la cognition et des modifications de l'électroencéphalogramme (EEG) enregistrées chez les personnes exposées aux champs EBF est recommandée, notamment chez les adultes régulièrement soumis à une exposition professionnelle et chez les enfants.

Les études comportementales sur des animaux immatures offrent un indicateur utile des effets cognitifs éventuels chez l'enfant. Les effets possibles d'une exposition pré- et postnatale aux champs magnétiques EBF sur le développement du système nerveux et la fonction cognitive devraient être étudiés. Ces études pourraient être utilement complétées par l'analyse des effets de l'exposition aux champs magnétiques EBF et aux champs électriques induits sur la croissance des cellules nerveuses au moyen de coupes de cerveaux ou de neurones en culture.

Il est nécessaire de s'intéresser plus avant aux conséquences sanitaires potentielles que laissent entrevoir les données expérimentales montrant des réponses opioïdes et cholinergiques chez l'animal. Les études portant sur la modulation des réponses opioïdes et cholinergiques chez l'animal doivent être étendues et il convient de définir des paramètres d'exposition et le fondement biologique de ces réponses comportementales.

16.2.5 Système neuroendocrinien

La base de données existante relative à la réponse neuroendocrinienne n'indique pas que l'exposition aux champs EBF pourrait avoir des effets indésirables sur la santé humaine. Par conséquent, aucune recommandation relative à des recherches supplémentaires n'est formulée.

16.2.6 Troubles neurodégénératifs

Plusieurs études ont montré un risque accru de sclérose latérale amyotrophique dans les "professions liées à l'électricité". On considère qu'il est important d'étudier cette association plus avant, de façon à découvrir si les champs magnétiques EBF font partie des causes de cette maladie neurodégénérative rare. Cette recherche demande de grandes études de cohortes prospectives comportant des informations sur l'exposition aux champs magnétiques EBF, aux chocs électriques et à d'autres facteurs de risque.

Il n'est pas certain que les champs magnétiques EBF constituent un facteur de risque de la maladie d'Alzheimer. Les données actuellement disponibles ne sont pas suffisantes et cette association doit être analysée de façon approfondie. L'utilisation des données de morbidité plutôt que de mortalité revêt une importance particulière.

16.2.7 Troubles cardio-vasculaires

Des recherches plus approfondies sur l'association entre champs magnétiques EBF et risque de maladie cardiovasculaire ne sont pas considérées comme une priorité.

16.2.8 Immunologie et hématologie

Les modifications observées dans les paramètres immunitaires et hématologiques d'adultes exposés aux champs magnétiques EBF ont montré des variations et il n'y a pratiquement aucune donnée issue de la recherche qui soit disponible sur les enfants. Par conséquent, la recommandation est de mener des études sur les effets de l'exposition aux EBF sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal.

16.2.9 Reproduction et développement

Il semblerait qu'il y ait un risque accru de fausse couche associé à l'exposition aux champs magnétiques EBF. Etant donné l'effet potentiellement important pour la santé publique d'une telle association, une recherche épidémiologique approfondie est recommandée.

16.2.10 Cancer

La priorité des priorités pour la recherche dans ce domaine consiste à résoudre le conflit entre les données épidémiologiques (qui montrent une association entre l'exposition aux champs magnétiques EBF et un risque accru de leucémie infantile) et les données expérimentales et mécanistiques (qui ne sont pas en faveur d'une telle association). Il est recommandé que les épidémiologistes et les spécialistes des sciences expérimentales collaborent dans ce domaine. Pour que les nouvelles études épidémiologiques soient instructives, elles doivent être axées sur de nouveaux aspects de l'exposition, sur l'interaction potentielle avec d'autres facteurs ou sur les groupes fortement exposés, ou doivent être novatrices à un autre titre dans ce domaine de recherche. De plus, il est également recommandé de mettre à jour les analyses existantes groupées, en ajoutant les données des études récentes et en donnant un nouvel éclairage à ces analyses.

Les études sur les tumeurs cérébrales chez l'enfant ont donné des résultats variables. Comme pour la leucémie infantile, une analyse groupée des études sur ces tumeurs serait très instructive et elle est donc recommandée. Une telle analyse globale peut, à peu de frais, donner un aperçu plus vaste et meilleur des données existantes, notamment sur l'existence d'un biais de sélection et, si les études sont suffisamment homogènes, peut offrir une meilleure estimation du risque.

Concernant le cancer du sein chez l'adulte, des études plus récentes ont montré de façon convaincante qu'il n'y avait aucune association avec l'exposition aux champs magnétiques EBF. Par conséquent, d'autres recherches sur une telle association devraient se voir accorder une très faible priorité à l'avenir.

Concernant la leucémie et le cancer du cerveau chez l'adulte, la recommandation est de mettre en œuvre de grandes cohortes de sujets exposés professionnellement qui existent. Les études sur l'exposition professionnelle, les analyses et les méta-analyses groupées relatives à la leucémie et au cancer du cerveau ont donné des résultats variables et peu concluants. Toutefois, de nouvelles données ont été publiées par la suite qui devraient être utilisées pour actualiser ces analyses.

La priorité est d'examiner les données épidémiologiques en établissant des modèles animaux et in vitro appropriés pour les réponses aux champs magnétiques EBF de faible intensité, modèles qui soient largement transférables d'un laboratoire à l'autre.

Les modèles de rongeurs transgéniques utilisés pour l'étude de la leucémie infantile doivent être développés de façon à fournir des modèles animaux expérimentaux permettant d'étudier les effets de l'exposition aux champs magnétiques EBF. Par ailleurs, pour les études existantes sur l'animal, la majorité des données disponibles indiquent qu'il n'y a pas d'effets cancérogènes dus aux seuls champs magnétiques EBF. Il faut par conséquent accorder un rang de priorité élevé aux études in vitro et chez l'animal dans lesquelles les champs magnétiques EBF sont rigoureusement évalués en tant que cofacteurs de la cancérogenèse.

Concernant les autres études in vitro, les expériences faisant état d'effets génotoxiques de l'exposition à un champ magnétique EBF intermittent doivent être reproduites.

16.2.11 Mesures de protection

Il est recommandé d'effectuer des recherches sur l'élaboration de politiques de protection sanitaire et sur la mise en œuvre de celles-ci dans les secteurs où il n'y a pas de certitude scientifique, plus précisément sur le recours au principe de précaution, l'interprétation de ce dernier et l'évaluation des effets des mesures de précaution prises contre les champs magnétiques EBF et autres agents rangés dans les "cancérogènes possibles pour l'homme". Lorsqu'il y a incertitude quant au risque sanitaire potentiel qu'un agent représente pour la société, des mesures de précaution peuvent être justifiées pour garantir la protection appropriée du grand public et des travailleurs. Seules des recherches limitées ont été effectuées dans ce domaine pour les champs magnétiques EBF et, parce qu'elles sont importantes, des recherches complémentaires sont nécessaires. Elles permettront peut-être aux pays d'intégrer le principe de précaution dans leurs politiques de protection de la santé.

Il est conseillé de procéder à une recherche approfondie sur la perception du risque et la communication sur les risques spécifiquement axée sur les champs électromagnétiques. Les facteurs psychologiques et sociologiques qui influent sur la perception du risque en général ont été largement étudiés. Toutefois, une recherche limitée a été menée pour analyser l'importance relative de ces facteurs dans le cas des champs électromagnétiques ou pour répertorier d'autres facteurs qui seraient spécifiques aux

champs électromagnétiques. Les études récentes laissent à penser que les mesures de précaution qui véhiculent implicitement des messages de risque peuvent modifier la perception du risque en augmentant ou en réduisant l'inquiétude. Des études approfondies dans ce domaine sont par conséquent justifiées.

Il convient de mener à bien une recherche sur l'élaboration d'une analyse coût-bénéfice/coût-efficacité afin d'atténuer l'exposition aux champs magnétiques EBF. Le recours à des analyses coût/bénéfice et coût/efficacité, afin d'évaluer si une orientation politique est bénéfique pour la société, a fait l'objet de recherches dans de nombreux secteurs de l'action des pouvoirs publics. L'élaboration d'un cadre qui recensera les paramètres nécessaires pour pouvoir effectuer cette analyse s'agissant des champs magnétiques EBF est nécessaire. Vu les incertitudes de l'évaluation, il faudra incorporer des paramètres quantifiables et non quantifiables.

Tableau 1. Recommandations de recherche

Sources, mesures et expositions	Priorité
Caractérisation approfondie des habitations soumises à une forte exposition au champ magnétique EBF dans différents pays	Moyenne
Recensement des lacunes dans les connaissances concernant l'exposition professionnelle aux EBF, par exemple s'agissant de l'IRM	Elevée
Evaluation de la capacité des installations électriques domestiques, en dehors des Etats-Unis d'Amérique, à induire des courants de contact chez l'enfant	Moyenne
Dosimétrie	
Dosimétrie numérique complémentaire reliant les champs électriques et magnétiques externes aux champs électriques internes, en particulier s'agissant de l'exposition à des champs électriques et magnétiques combinés dans diverses orientations	Moyenne
Calcul des champs et courants électriques induits chez la femme enceinte et chez le fœtus	Moyenne
Affinement des modèles micro-dosimétriques prenant en compte l'architecture cellulaire des réseaux nerveux et autres systèmes tissulaires complexes	Moyenne
Mécanismes biophysiques	
Etude approfondie des mécanismes des paires de radicaux dans les cellules immunitaires qui génèrent des espèces radicalaires de l'oxygène dans le cadre de leur fonction phénotypique	Moyenne
Etude théorique et expérimentale approfondie du rôle possible de la magnétite dans la sensibilité au champ magnétique EBF	Faible

Détermination des seuils de réponse aux champs électriques internes induits par les EBF sur les systèmes multicellulaires, comme les réseaux nerveux, à l'aide de méthodes théoriques et in vitro	Elevée
Neurocomportement	
Etudes cognitives, sur le sommeil et l'EEG de volontaires, notamment des enfants et des sujets exposés professionnellement, dans un large éventail de fréquences EBF à des densités de flux élevées	Moyenne
Etudes de la fonction cognitive chez l'animal après exposition pré- et postnatale	Moyenne
Etude approfondie des réponses opioïdes et cholinergiques chez l'animal	Faible
Troubles neurodégénératifs	
Etudes complémentaires sur le risque de sclérose latérale amyotrophique dans les professions liées à l'électricité et en rapport avec une exposition à un champ magnétique EBF et de maladie d'Alzheimer en rapport avec l'exposition à un champ magnétique EBF	Elevée
Immunologie et hématologie	
Etudes sur les conséquences de l'exposition à un champ magnétique EBF sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal	Faible
Reproduction et développement	
Etude complémentaire sur le lien éventuel qui existerait entre fausses couches et exposition à un champ magnétique EBF	Faible
Cancer	
Actualisation des analyses groupées existantes sur la leucémie infantile à l'aide des nouvelles données	Elevée
Analyses groupées des études existantes sur les tumeurs cérébrales chez l'enfant	Elevée
Mise à jour des méta-analyses existantes relatives à la leucémie et aux tumeurs cérébrales chez l'adulte et aux cohortes de sujets exposés professionnellement	Moyenne
Mise au point de modèles murins transgéniques de leucémie infantile utilisables dans les études sur les EBF	Elevée
Evaluation des effets co-cancérogènes au moyen d'études in vitro chez l'animal	Elevée
Tentative de reproduction des études de génotoxicité in vitro	Moyenne
Mesures de protection	
Recherche sur l'élaboration de politiques de protection de la santé et sur leur mise en oeuvre dans les secteurs où il n'y a pas de certitude scientifique	Moyenne

Recherche complémentaire sur la perception du risque et la communication sur les risques axée sur les champs électromagnétiques	Moyenne
Elaboration d'une analyse coût-bénéfice/coût-efficacité pour l'atténuation des champs EBF	Moyenne
