

RESUME ET RECOMMANDATIONS POUR LES ETUDES ULTERIEURES

13.1 Résumé

13.1.1 Sources naturelles et anthropogéniques

Des champs électriques statiques sont présents à l'état naturel dans l'atmosphère. Sous les nuages d'orage ils peuvent atteindre une valeur de 3 kV m^{-1} , mais par beau temps, leur valeur se situe normalement entre 1 et 100 V m^{-1} . En dehors de cela, la cause la plus commune d'exposition à des champs électrostatiques est la séparation des charges provoquée par les frottements. Par exemple, en marchant sur un tapis non conducteur, on peut faire naître, par accumulation de charges électriques, des potentiels de plusieurs kilovolts capables d'engendrer des champs électrostatiques locaux allant jusqu'à 500 kV par mètre. L'intensité du champ électrostatique créé par les lignes de transport de courant continu peut atteindre 20 kV m^{-1} ; elle peut aller jusqu'à 300 kV m^{-1} à l'intérieur des trains à traction électrique par courant continu et à 30 cm d'un système de visualisation (VDU), on enregistre des champs électriques de 10 à 20 kV m^{-1} .

A la surface de la Terre, le champ magnétique terrestre varie entre 35 et $70 \text{ } \mu\text{T}$ et il joue un rôle dans l'orientation et la migration de certaines espèces animales. Chaque fois qu'on utilise des courants continus, par exemple pour certains moyens de transport, diverses opérations industrielles comme la production d'aluminium ou le soudage au gaz, on produit des champs magnétostatiques. On a enregistré des valeurs de la densité de flux magnétique allant jusqu'à 2 mT à l'intérieur des trains à traction électrique et dans les systèmes à lévitation magnétique (MagLev) en cours de développement. Dans les ateliers où s'opère la réduction électrolytique de l'alumine, le personnel est exposé à des champs encore plus intenses (jusqu'à 60 mT environ) et dans un rayon de 1 cm autour des câbles de soudage à l'arc, le champ est d'environ 5 mT .

L'arrivée des supraconducteurs dans les années 1970 à 1980 a facilité l'utilisation de champs magnétiques beaucoup plus intenses pour le diagnostic médical grâce à la mise au point de techniques comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM), la spectroscopie par résonance magnétique (SRM)² ou encore la résonance magnétique nucléaire (RMN) dans le domaine de la recherche. On estime que l'on a pratiqué jusqu'ici quelque 200 millions d'IRM dans le monde. Le champ magnétostatique engendré par un appareil d'IRM est dû aux aimants permanents, aux aimants supraconducteurs et à leurs combinaisons; il est

² Dans tout le texte, il n'est question que de l'IRM, mais l'exposition au champ généré par les dispositifs de SRM est du même ordre.

de l'ordre de 0,2 à 3 T dans le cas des appareils habituellement utilisés dans la pratique clinique. En recherche, on a recours à des champs plus intenses, pouvant aller jusqu'à 9,4 T, pour l'imagerie du corps entier. Le champ parasite généré par les aimants utilisés en IRM est bien défini et il est réduit au minimum avec les appareils muni d'un blindage approprié. En ce qui concerne l'exposition de l'opérateur au niveau de la console de commande, on a généralement une densité de flux magnétique d'environ 0,5 mT, mais cette valeur peut être dépassée. Cela étant, l'exposition professionnelle peut atteindre ou dépasser 1 T lors du montage et de l'essai de ces appareils ou encore lors d'actes médicaux pratiqués pendant une IRM interventionnelle. Dans certaines recherches en physique ou lors de la mise en oeuvre de techniques nécessitant des énergies élevées, on utilise également des supraconducteurs et le personnel peut alors être exposé régulièrement et longuement à des champs susceptibles d'atteindre 1,5 T.

13.1.2 Mécanismes d'interaction

Les données expérimentales ont permis d'établir l'existence de trois types d'interaction physique entre les champs magnétostatiques et les systèmes biologiques, à savoir :

- 1) Les interactions électrodynamiques avec les courants de conduction ionique. Ces interactions entre un champ magnétostatique et un courant ionique sont dues aux forces de Laplace-Lorentz qui s'exercent sur les charges en mouvement. Ces effets font apparaître des potentiels (potentiels d'écoulement) et des courants électriques. Chez l'Homme et l'animal, les potentiels d'écoulement sont généralement liés à la contraction ventriculaire et à l'éjection du sang dans l'aorte. L'interaction de Laplace-Lorentz engendre également une force magnétohydrodynamique qui s'oppose à l'écoulement du sang. On a calculé qu'en présence d'un champ de 15 T, l'écoulement du sang dans l'aorte pouvait être réduit dans une proportion pouvant aller jusqu'à 10 %.
- 2) Les effets magnétomécaniques, et notamment l'orientation des structures présentant une anisotropie magnétique dans un champ uniforme et le déplacement des matériaux paramagnétiques et ferromagnétiques dans un gradient de champ magnétique. Les interactions dues aux forces et aux couples qui s'exercent sur les objets métalliques endogènes ou exogènes constituent un point extrêmement important.
- 3) Les effets sur les états de spin électronique des intermédiaires réactionnels. Les effets chimiques et biologiques des champs magnétiques sont depuis longtemps envisagés dans le cadre de la chimie des paires de radicaux à spins corrélés. Plusieurs types de réactions chimiques organiques sont sensibles aux champs

magnétostatiques d'une intensité comprise entre 10 et 100 mT en raison de l'effet que ces champs exercent sur les états de spin des intermédiaires réactionnels. Une paire de radicaux à spins corrélés peut se recombinaison et empêcher la réaction de se produire lorsque les deux conditions suivantes sont respectées: a) la paire formée, qui se trouve à l'état triplet, doit passer à l'état singulet sous l'effet d'un certain mécanisme ; b) les radicaux doivent être à nouveau en interaction physique pour pouvoir se recombinaison. L'étape a) peut être sensible à l'action d'un champ magnétique. La plupart des recherches concernent la possibilité d'utiliser les effets des champs magnétiques sur les paires de radicaux pour étudier les réactions enzymatiques. Il ne semble toutefois pas qu'il puisse y avoir d'effets ayant des conséquences d'ordre physiologique sur les fonctions cellulaires ni d'ailleurs d'effets mutagènes à long terme qui découleraient des modifications produites par les champs magnétiques sur la concentration ou le flux des radicaux libres.

Dosimétrie

Pour bien comprendre les effets biologiques des champs électriques ou magnétiques, il faut s'intéresser aux champs qui influent directement sur les cellules des différentes parties de l'organisme et des tissus. On peut dans ce cas définir la dose au moyen d'une fonction appropriée de l'intensité du champ électrique ou magnétique au point d'interaction. La dosimétrie a pour principal objet d'établir la relation qui existe entre les champs extérieurs non perturbés et les champs internes. A cet égard, les études informatiques utilisant des modèles voxelisés d'organismes humains et animaux, de même que l'étude expérimentale de l'exposition, jouent un rôle important.

Les interactions entre un champ magnétostatique et un tissu donné impliquent vraisemblablement comme paramètres les propriétés physiques suivantes du champ:

le vecteur champ magnétique, le gradient du champ et/ou le produit de ces grandeurs, qui est une force. Certaines interactions plus importantes résultent de déplacements qui se produisent dans un champ ou un gradient de champ, en raison par exemple de mouvements du corps ou du courant sanguin.

Les paramètres dosimétriques appropriés sont choisis en fonction du mécanisme physique qui conditionne le problème de sécurité en cause. Il est clair qu'aucun objet ferromagnétique ne doit se trouver à proximité de l'aimant. Il est donc impératif de vérifier qu'il n'y a aucun objet de ce genre ni d'implants qui pourraient entrer en mouvement sous l'action des forces ou des couples exercés. Il est bon de mesurer la valeur maximale

du vecteur induction magnétique ainsi que celle de la force magnétique. On peut cartographier le champ de manière à pouvoir déterminer son intensité en divers points du voisinage de l'aimant où le personnel pourrait être exposé, mais le port de dosimètres personnels est peut-être plus utile.

Les mouvements du corps ou de certaines parties du corps, par exemples des yeux ou de la tête, qui se produisent dans un gradient de champ magnétostatique vont également donner naissance à un champ et à un courant électriques pendant la durée de ces mouvements. Les calculs dosimétriques montrent que des mouvements normaux induisent un champ électrique notable à proximité ou à l'intérieur d'un champ d'intensité supérieure à 2-3 T et leur présence pourrait expliquer les nombreux cas de vertiges ou de phosphènes magnétiques occasionnels subis par des malades, des volontaires ou des personnels lors de mouvements dans le champ magnétique.

Les sources d'exposition sont multiples. Les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) en sont l'une des plus généreuses. Au cours de la dernière décennie, on s'est attaché à faire en sorte que ces appareils travaillent avec des champs très intenses. Avec l'appareillage le plus couramment utilisé dans la pratique clinique, le champ central est de 1,5 T, mais on accepte maintenant d'utiliser en routine des dispositifs travaillant avec un champ de 3,0 T et en 2004, plus de 100 de ces appareils étaient en usage dans le monde. On met actuellement au point pour la recherche en imagerie clinique des appareils qui utilisent un champ de 4 à 9,4 T. A mesure que l'intensité du champ d'un appareil d'IRM augmente, il en va de même des divers types d'interactions susceptibles de se produire entre ce champ et les tissus. Cette tendance à utiliser des champs intenses, rend d'autant plus importante la connaissance des interactions entre les champs électromagnétiques engendrés par les appareils d'IRM et l'organisme humain.

13.1.3 Etudes *in vitro*

Les études *in vitro* fournissent des données qui sont utiles pour élucider les mécanismes d'interaction et déterminer quelles sortes d'effets seraient à étudier *in vivo*, mais sans une confirmation par des études *in vivo*, elles sont insuffisantes pour permettre de mettre en évidence les effets sanitaires.

Un certain nombre d'effets biologiques dus aux champs magnétostatiques ont été étudiés *in vitro*. On les a étudiés à différents niveaux d'organisation : systèmes acellulaires constitués de membranes ou d'enzymes isolées ou impliquant certaines réactions biochimiques ou encore divers modèles cellulaires constitués de cellules bactériennes ou mammaliennes. Les points d'aboutissement des interactions étudiées étaient les suivants :

orientation cellulaire , activité métabolique cellulaire, physiologie des membranes cellulaires, expression des gènes , croissance cellulaire et génotoxicité. Sur tous ces points, on a fait état de résultats positifs ou négatifs, mais dans la plupart des cas, ils n'ont pas été reproduits. Les effets observés sont plutôt variés et ont été constatés après exposition à une large gamme de densités de flux magnétique. Il apparaît qu'un champ magnétostatique peut avoir plusieurs effets biologiques à des intensités inférieures à 1 T et de l'ordre du mT. Pour quelques-uns de ces effets, l'existence d'un seuil a été indiquée, mais selon d'autres études, la réponse ne serait pas linéaire et ne comporterait pas de seuil bien défini.

Au dessus de 1 T , on constate systématiquement un effet du champ magnétostatique sur l'orientation des cellules, mais la signification de cet effet *in vivo* reste discutable. Quelques études donnent à penser que l'association d'un champ magnétostatique et d'autres agents comme par exemple des substances chimiques génotoxiques pourrait peut-être avoir des effets synergiques, aussi bien protecteurs que stimulants. Les données actuelles sont insuffisantes et doivent être confirmées pour que l'on puisse en tirer des conclusions définitives en ce qui concerne la santé humaine.

Outre leurs relations complexes avec des paramètres physiques tels que l'intensité, la durée, la répétition ou le gradient de l'exposition, les variables biologiques jouent manifestement un rôle important dans les effets exercés par les champs magnétostatiques. On a ainsi montré que des variables comme le type de cellule, l'activation cellulaire et d'autres états physiologiques présents lors de l'exposition pouvaient influencer les résultats expérimentaux. Les mécanismes à la base de ces effets ne sont pas connus, mais il pourrait y avoir des effets sur les radicaux et les ions .Des études *in vitro* fournissent certaines indications sur ce point.

Pour autant qu'elles mettent en évidence des effets biologiques, les très rares études portant sur les signaux IRM et autres champs associés n'en révèlent aucun qui soit différent de ceux que produisent à eux seuls les champs magnétostatiques.

Dans l'ensemble, l'expérimentation *in vitro* ne permet pas de se faire une idée claire des effets spécifiques exercés par les champs magnétostatiques et de ce fait, elle ne permet pas de conclure à la possibilité d'effets nocifs sur la santé.

13.1.4 Etudes sur l'animal

Il n'y a guère eu d'études consacrées aux effets des champs électrostatiques sur l'animal; aucun signe d'effets sanitaires indésirables n'a été observé autres que ceux qui résultent des sensations liées à la présence de charges électriques superficielles.

S'agissant des effets des champs magnétostatiques, un grand nombre d'études ont été effectuées sur l'animal. La plupart de celles qui sont jugées utiles en ce qui concerne la santé humaine portent sur des champs beaucoup plus intenses que le champ magnétique terrestre. Certaines d'entre elles portent notamment sur l'exposition à des champs dont l'intensité est de l'ordre du millitesla, c'est-à-dire comparable à une exposition relativement élevée en milieu industriel. Plus récemment, l'avènement des technologies utilisant des aimants supraconducteurs et de l'IRM a suscité des études sur les effets comportementaux, physiologiques et génésiques pour des densités de flux magnétique approximativement égales ou supérieures à 1 T. Toutefois, rares sont celles qui examinent les effets chroniques possibles de l'exposition, notamment d'éventuels effets cancérigènes.

Les réactions les plus régulièrement observées lors des études neurocomportementales incitent à penser que les mouvements d'un rongeur de laboratoire dans un champ magnétostatique égal ou supérieur à 4 T peut provoquer des sensations désagréables qui déterminent une aversion et des réflexes d'évitement conditionnés. On estime que ces observations cadrent bien avec des effets magnétohydrodynamiques sur l'endolymphe de l'appareil vestibulaire. Les autres résultats sont variables.

On est fondé à penser que plusieurs espèces de vertébrés et d'invertébrés sont capables de s'orienter en utilisant des champs magnétostatiques d'intensité aussi faible que celle du champ magnétique terrestre, mais on estime que ces comportements sont sans aucun rapport avec d'éventuels effets sur la santé humaine.

Il est largement prouvé que l'exposition à des champs d'intensité supérieure à environ 1 T

(0,1 T dans le cas des gros animaux) engendre des potentiels d'écoulement dans le voisinage du cœur et des gros vaisseaux, mais les conséquences physiologiques de ce phénomène ne sont pas clairement établies. Des porcs exposés plusieurs heures dans la région du cœur à une densité de flux magnétique très élevée dont la valeur pouvait atteindre 8 T n'ont présenté aucun effet cardiovasculaire. Chez le lapin, une exposition de brève ou de longue durée à des champs dont l'intensité allait de celle du champ terrestre à des valeurs de l'ordre du millitesla, auraient provoqué des effets sur l'appareil cardiovasculaire, mais les données ne sont pas très probantes.

Une équipe a obtenu des résultats qui donnent à penser qu'un champ magnétique de l'ordre du mT pourrait inhiber une élévation précoce de la tension artérielle par le truchement du système de régulation hormonale. Selon cette même équipe, un champ magnétostatique de faible intensité (jusqu'à 0,2 T) pourrait, grâce à des effets localisés sur le courant

sanguin, apporter une amélioration de la microcirculation. Par ailleurs, selon une autre équipe, pour des valeurs de la densité de flux magnétique allant jusqu'à 10 T, il pourrait y avoir réduction du courant sanguin et de la température cutanés. Dans tous ces cas cependant, les points d'aboutissement des effets biologiques sont plutôt labiles, avec une situation qui a pu être compliquée par des interventions pharmacologiques - notamment une anesthésie dans certains cas - et par l'immobilisation des sujets. Dans l'ensemble, il est difficile d'aboutir à des conclusions définitives sans que ces résultats soient reproduits de façon indépendante.

Il existe plusieurs études qui décrivent les effets possibles d'une exposition à un champ magnétique sur les éléments figurés du sang et le système hématopoïétique. Toutefois, leurs résultats sont ambigus, ce qui limite les conclusions que l'on peut en tirer. Les données dont on dispose au sujet des effets produits par une exposition à un champ magnétostatique sur les constituants ioniques et enzymatiques du sérum émanent essentiellement d'un seul laboratoire. Il faut que ces résultats soient confirmés par des laboratoires indépendants avant que l'on puisse en tirer des conclusions.

En ce qui concerne les effets sur le système endocrine, plusieurs études effectuées par un laboratoire tendent à montrer que l'exposition à un champ magnétostatique peut affecter la synthèse épiphysaire et notamment la teneur en mélatonine. Toutefois, lors d'études effectuées dans d'autres laboratoires, cet effet n'a pas pu être mis en évidence. Avant de pouvoir tirer des conclusions définitives quant à un effet supprimeur des champs magnétostatiques sur la synthèse de la mélatonine, la confirmation de cet effet par d'autres recherches est nécessaire. D'une façon générale et à part le cas de l'épiphyse, peu de travaux ont été consacrés à l'étude des effets des champs magnétostatiques sur le système endocrine. Aucun effet ne semble avoir été systématiquement observé.

Les effets génésiques et développementaux d'une exposition au champ généré par les appareils d'IRM sont une considération très importante pour les malades comme pour le personnel soignant. On ne possède à cet égard que quelques bonnes études portant sur des champs magnétostatiques d'intensité supérieure à 1 T. Les études par IRM ne pas informatives en soi car l'effet du champ statique ne peut pas être distingué des effets éventuellement produits par les champs de radiofréquence et les champs à gradient pulsé en général. Ces points doivent être examinés sans délai pour que l'on puisse évaluer le risque sanitaire lié à ce type d'exposition.

En ce qui concerne la génotoxicité et les effets cancérigènes, les études sur l'animal sont, dans l'ensemble, si peu nombreuses que l'on ne peut en tirer aucune conclusion définitive.

13.1.5 Etudes en laboratoire sur des sujets humains

Un champ électrostatique ne pénètre pas à l'intérieur des corps conducteurs, comme l'organisme humain ; le champ provoque l'apparition de charges électriques superficielles et il est toujours dirigé normalement à la surface du corps. Lorsque la densité de la charge superficielle est suffisamment grande, elle devient perceptible par son interaction avec le système pileux ou encore par d'autres effets comme des décharges électriques sous forme d'étincelles (microchocs). Le seuil de perception individuel dépend de divers facteurs et peut se situer entre 10 et 45 kV m⁻¹. Le seuil de sensation désagréable est sans doute également variable, mais il n'a pas été étudié de façon systématique. Des microchocs douloureux peuvent se produire lorsqu'une personne bien isolée du sol touche un objet qui est à la terre ou lorsque une personne "à la terre" touche un corps conducteur bien isolé du sol; toutefois, la valeur-seuil du champ électrostatique dépend du degré d'isolation et de divers autres facteurs.

L'expérimentation sur des sujets humains porte sur des points tels que la fonction nerveuse périphérique, l'activité cérébrale, les fonctions neurocomportementales et cognitives, la perception sensorielle, la fonction cardiaque, la tension artérielle, la fréquence cardiaque, les taux sériques de protéines et d'hormones, la température centrale et cutanée et les effets thérapeutiques. On a travaillé avec des niveaux d'exposition allant jusqu'à 8 T et les études ont porté sur des champs purement statiques ainsi que sur les champs engendrés par les appareils d'IRM. Les durées d'exposition allaient de quelques secondes à neuf heures, mais elles étaient généralement inférieures à une heure. Les données disponibles sont limitées et ce, pour plusieurs raisons; en général, les échantillons prélevés sur les patients ou des volontaires en bonne santé étaient ceux qu'il était commode d'obtenir et le nombre de sujets était faible.

D'après les résultats obtenus, il ne semble pas que l'exposition à un champ magnétostatique ait un effet sur les réactions neurophysiologiques ni sur les fonctions cognitives de volontaires immobiles, mais ces résultats ne permettent pas non plus d'exclure l'existence de tels effets. Des travailleurs, des patients et des volontaires qui effectuaient des mouvements dans un champ statique de plus de 2 T environ, ont ressenti des vertiges et des nausées qui dépendaient de la dose. Selon une étude, on a constaté chez des personnes qui se tenaient à proximité d'un appareil d'IRM de 1,5 T, une diminution de la coordination oeil-main et une perte de sensibilité aux contrastes en vision de près. L'apparition de ces effets dépend vraisemblablement du gradient du champ et des mouvements effectués par le sujet. Certaines études font état de petites variations dans la tension artérielle et la fréquence cardiaque, mais qui restent cependant dans les limites physiologiques normales. Rien n'indique que les champs magnétostatiques aient des effets sur d'autres aspects de la physiologie du

système cardiovasculaire, ni sur les protéines ou hormones sériques. Jusqu'à une valeur de 8 T, il ne semble pas que ces champs provoquent des variations de température chez les sujets humains.

A noter toutefois que la plupart des études étaient de faible envergure, utilisaient des échantillons commodes à obtenir et portaient souvent sur des groupes de sujets non comparables. Il n'est donc pas possible de tirer la moindre conclusion concernant les effets très divers examinés dans le présent rapport.

13.1.6 Etudes épidémiologiques

Les études épidémiologiques qui ont été effectuées concernent presque exclusivement des travailleurs exposés à des champs magnétostatiques engendrés par des appareils alimentés en courant continu de forte intensité. La plupart de ces travailleurs étaient exposés à des champs magnétostatiques allant jusqu'à plusieurs dizaines de mT; il s'agissait de soudeurs, de fondeurs d'aluminium ou de travailleurs employés dans diverses installations industrielles effectuant des opérations de séparation chimique dans de grandes cuves d'électrolyse. Il est cependant possible que ces activités aient exposé les travailleurs à toutes sortes de fumées et d'aérosols potentiellement toxiques constituant autant de facteurs de confusion. Les effets étudiés chez ces travailleurs étaient les suivants: cancers, anomalies hématologiques et leurs conséquences, fréquence des aberrations chromosomiques, conséquences sur le plan génésique et troubles musculosquelettiques. En outre, quelques études ont porté sur la fécondité et l'issue de la grossesse d'opératrices d'appareils IRM ayant pu être exposées à des champs magnétostatiques relativement intenses allant jusqu'à 1 mT environ. Deux de ces études ont examiné l'issue de la grossesse de volontaires en bonne santé ayant subi des examens par IRM pendant la gestation.

Il a été fait état d'un risque accru de cancers de diverses localisations, par exemple de cancers du poumon, du pancréas ou encore d'affections hématologiques malignes, mais il n'y a guère de concordance entre les résultats des différentes études. Les rares études épidémiologiques publiées jusqu'ici laissent un certain nombre de questions sans réponse eu égard à la possibilité d'un risque accru de cancer en cas d'exposition à des champs magnétostatiques. L'évaluation de l'exposition laisse à désirer et comme certaines études n'ont porté que sur un nombre de sujets très restreint, elles ne peuvent, dans le cas de maladies aussi rares, n'observer de risque que lorsque celui-ci est très élevé. On est d'autant plus fondé à douter de la capacité de ces investigations à fournir des informations utiles qu'on manque de preuves indubitables au sujet d'autres facteurs cancérigènes mieux connus qui étaient également présents sur certains des lieux de travail étudiés. D'autres effets sanitaires non néoplasiques ont été également envisagés, mais de façon encore plus sporadique. La

plupart de ces travaux portent sur des effectifs très faibles et présentent nombre d'insuffisances sur le plan méthodologique. On n'a pas suffisamment étudié d'autres situations ou des travailleurs - par exemple des opérateurs IRM - pourraient être exposés à des champs intenses. Les données actuelles sont insuffisantes pour permettre une évaluation d'ordre sanitaire.

13.1.7 Evaluation du risque sanitaire

Champs électrostatiques

On ne dispose pas d'études sur l'exposition à des champs électrostatiques dont on puisse tirer une conclusion quant à l'existence d'effets chroniques ou retardés. Selon le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC, 2002) les données sont insuffisantes pour permettre de se prononcer sur la cancérogénicité des champs électrostatiques.

Peu d'études ont été consacrées aux effets aigus d'une exposition à un champ électrostatique. Dans l'ensemble, les résultats obtenus indiquent qu'il n'y a d'autre effet aigu indésirable que celui qui est lié à la perception directe du champ et à la sensation désagréable produite par les microchocs électriques.

Champs magnétostatiques

En ce qui concerne les effets chroniques ou retardés, les données fournies par les études épidémiologiques et les travaux de laboratoire sont insuffisantes pour permettre de tirer la moindre conclusion. Le CIRC (CIRC, 2002) estime ne pas avoir de preuves suffisantes, ni de données valables tirées de l'expérimentation animale, pour conclure que l'exposition à un champ magnétostatique a des effets cancérogènes chez l'Homme. Il n'est donc pas possible, à l'heure actuelle, d'affecter les champs magnétostatiques à une classe quelconque de cancérogénicité.

Une exposition de brève durée à un champ magnétostatique de l'ordre du tesla et au gradient de champ associé provoque un certain nombre d'effets aigus.

Des réactions de nature cardiovasculaire - modification de la tension artérielle et de la fréquence cardiaque - ont parfois été observées chez des volontaires humains ainsi que lors d'études sur l'animal. Toutefois, pour des expositions à des champs allant jusqu'à 8 T, elles sont restées dans les limites physiologiques normales.

Bien que ce point n'ait pas été vérifié expérimentalement, il est important de noter que le calcul permet de conclure à l'existence possible de trois effets dus aux potentiels d'écoulement induits : une légère modification de

la fréquence cardiaque (dont on peut considérer qu'elle est sans conséquence pathologique), la production d'extrasystoles (qui pourrait être plus importante sur le plan physiologique) et un risque accru d'arythmie par réentrée (susceptible de déboucher sur une fibrillation ventriculaire). On pense que pour les deux premiers effets, le seuil se situe au-delà de 8 T. Dans le cas du troisième, la valeur du seuil est encore difficile à déterminer en raison de la complexité de la modélisation. Environ 5 à 10 personnes sur 10 000 sont particulièrement sensibles à une arythmie par réentrée et ces personnes peuvent présenter un risque plus important en cas d'exposition à un champ magnétostatique ou à un gradient de champ.

Toutefois, les données disponibles présentent de telles insuffisances que dans leur ensemble, elles ne permettent pas de tirer de conclusions définitives quant aux effets des champs magnétostatiques sur les paramètres physiologiques évoqués plus haut.

Lorsqu'un sujet effectue des mouvements dans un gradient de champ statique, il peut éprouver une sensation de vertige, des nausées, parfois des phosphènes et un goût métallique au niveau de la cavité buccale si l'intensité du champ statique dépasse environ 2 à 4 T. Même s'ils sont passagers, ces effets peuvent être indésirables pour le sujet. S'ajoutant à une éventuelle perte de coordination œil-main, ces effets peuvent perturber l'exécution de tâches délicates (interventions chirurgicales par ex.) et donc menacer la sécurité.

On a fait état d'autres effets sur les réactions physiologiques, mais il est difficile d'en tirer des conclusions définitives tant que ces résultats n'auront pas été reproduits de façon indépendante.

13.1.8 Recommandations à l'intention des autorités nationales

Il est recommandé aux autorités nationales de mettre en œuvre des programmes en vue de protéger la population et les travailleurs contre tout effet nocif des champs statiques. Toutefois, comme le principal effet d'un champ électrostatique est la sensation désagréable provoquée par les décharges électriques qu'il provoque dans les tissus de l'organisme, ce programme de protection pourrait consister simplement à indiquer dans quels cas on risque de se trouver exposé à un champ électrostatique intense et comment éviter ce genre de situation. Dans le cas des champs magnétostatiques, il est nécessaire d'établir un programme de protection contre les effets aigus dont ils sont reconnus responsables. Comme les informations dont on dispose actuellement au sujet de leurs effets chroniques ou retardés sont insuffisantes, il pourrait être nécessaire de prendre certaines mesures de précaution analogues à celles qu'a élaborées l'OMS (www.who.int/emf) afin de limiter l'exposition de la population et des travailleurs.

Les autorités nationales devraient adopter des normes fondées sur des données scientifiques solides afin de limiter l'exposition de la population aux champs magnétostatiques. La fixation de normes à visée sanitaire constitue la mesure de protection primordiale pour la population et les travailleurs. Il existe des normes internationales applicables aux champs magnétostatiques (CIPRNI, 1994) qui sont exposées à l'appendice 1. L'OMS recommande cependant de revoir ces normes à la lumière des données les plus récentes publiées dans la littérature scientifique.

Les autorités nationales devraient établir des programmes - ou compléter les programmes existants - en vue d'assurer une protection contre les effets éventuels des champs magnétostatiques. En ce qui concerne les mesures de protection à mettre en oeuvre dans le cadre de l'usage industriel et scientifique des champs magnétiques, on peut distinguer les mesures d'ordre technique, le respect d'une certaine distance par rapport à l'appareillage et les mesures administratives. La protection contre les dangers secondaires résultant d'interférences magnétiques avec des équipements de secours, l'appareillage électronique médical ou encore avec des implants chirurgicaux ou dentaires est un domaine d'une importance toute particulière, compte tenu des effets indésirables possibles des champs magnétostatiques. En raison des forces mécaniques susceptibles de s'exercer sur les implants ferromagnétiques et les objets non fixés dans une installation où règnent des champs intenses, des précautions doivent être prises.

Les autorités nationales doivent envisager de soumettre à une autorisation préalable les installations d'IRM afin de faire en sorte que les mesures de précaution soient effectivement prises. Dans ce cas, les installations d'IRM dont l'intensité du champ dépasse la norme nationale ou est supérieure à 2 T devraient également satisfaire à des exigences supplémentaires. Il s'agit en l'occurrence des informations à fournir au sujet des malades, du personnel et de tout incident ou lésion imputable à la présence de champs magnétiques intenses.

Les autorités nationales doivent financer des recherches visant combler les lacunes importantes qui subsistent au sujet de la sécurité des personnes exposées à des champs magnétostatiques. Les futures recherches à entreprendre sont indiquées dans la suite du présent document (voir plus loin) et également exposées sur le site Internet de l'OMS (voir www.who.int/emf). Les chercheurs doivent recevoir un financement qui leur permette d'effectuer les études recommandées dans le programme de recherche de l'OMS.

Il faut que les autorités nationales apportent un appui financier aux installations d'IRM pour leur permettre de recueillir, sur l'exposition de leur personnel et de leurs patients aux champs magnétostatiques, des informations qui seront mises à la disposition des futures études

épidémiologiques. Elles devront également financer l'établissement de banques de données où seront rassemblées des informations sur les travailleurs qui subissent une exposition de longue durée, comme c'est le cas du personnel employé à la fabrication des appareils d'IRM et d'appareillages utilisant également des aimants de forte puissance ou qui travaille sur des technologies nouvelles comme les trains à lévitation magnétique.

13.2 Recommandations en vue des études futures

La mise en évidence des lacunes qui subsistent dans nos connaissances est un élément essentiel de l'évaluation de ce risque sanitaire et on trouvera ci-après des recommandations en vue des recherches futures.

13.2.1 Champs électrostatiques

Il ne semble pas qu'il y ait grand intérêt à poursuivre la recherche sur les effets sanitaires éventuels des champs électrostatiques. Aucune des études effectuées à ce jour n'indique l'existence d'effets indésirables, si ce n'est la possibilité d'un stress en cas d'exposition prolongée à des microchocs électriques. Dans ces conditions, il n'y a pas lieu de recommander d'autres recherches sur les effets biologiques des champs électrostatiques. Par ailleurs, les occasions d'exposition importante à de tels champs sur les lieux de travail ou de vie restent limitées et ne justifient donc pas d'études épidémiologiques.

13.2.2 Champs magnétostatiques

En règle générale, les recherches menées jusqu'ici ne l'ont pas été de façon systématique et ont souvent été effectuées en l'absence de méthodologie appropriée et d'information sur l'exposition. Des programmes de recherche coordonnés sont recommandés en vue d'une meilleure systématisation de la recherche. Il faudrait également étudier l'incidence de paramètres physiques tels que l'intensité, la durée et le gradient sur l'issue biologique de l'exposition.

13.2.2.1 Etudes théoriques et études sur modèles informatiques

La dosimétrie informatique permet de relier le champ magnétostatique extérieur aux champs électriques et aux courants induits internes qui sont engendrés par les mouvements des tissus vivants dans ce champ. Cet outil théorique permet de caractériser le champ au niveau d'un organe ou d'un tissu donné. Il existe quatre fantômes anthropomorphes voxélisés à haute résolution, anatomiquement réalistes, qui représentent des adultes de sexe masculin. Ces fantômes sont largement utilisés pour l'étude des champs électromagnétiques variables dans le temps. Par contre, très peu de travaux ont été effectués sur les champs magnétostatiques et on estime qu'il est important de poursuivre la recherche au moyen de ces modèles. Il

importe en outre de travailler sur des fantômes de tailles diverses et sur des fantômes anthropomorphes féminins modélisant notamment des femmes enceintes porteuses de fœtus à différents âges. On pourrait également effectuer des études sur des fantômes de femelles gravides pour faciliter l'interprétation des études sur le développement au moyen de tels modèles (**priorité moyenne**).

Il faudrait mettre au point un fantôme anthropomorphe modélisant la tête et les épaules et l'utiliser pour étudier les champs et les courants électriques ainsi que les phosphènes ou vertiges auxquels ils semblent associés. Ce genre de modèle pourrait également être utilisé pour étudier les champs et courants engendrés par les mouvements de la tête et des yeux dans un champ magnétostatique. Ce dernier point est jugé particulièrement important en IRM interventionnelle, lorsque la réduction des mouvements de la tête des chirurgiens et autres personnels cliniques peut contraindre à une augmentation des mouvements oculaires. Il faudrait également simuler les grands mouvements effectués par le personnel autour de l'appareil (**priorité élevée**).

On estime important de procéder à des calculs basés sur une modélisation détaillée du myocarde et des pathologies cardiaques courantes. Cette modélisation devrait prendre en compte la microarchitecture du cœur ainsi que les petits vaisseaux du myocarde où seraient susceptibles d'apparaître des champs et des courants capables d'influer sur la génération du rythme par le noeud sinusal et sur la propagation de l'onde de dépolarisation. En outre, il est nécessaire de déterminer par le calcul l'intensité et la distribution spatiale des courants induits dans le myocarde par l'exposition à un champ et à un gradient de champ. Il faudrait étudier un grand nombre d'orientations par rapport à la direction du vecteur champ, ce qui permettrait une comparaison avec les courants dont le calcul a montré qu'ils produisent des effets cardiaques. Il est recommandé de s'appuyer sur des études expérimentales et des expériences en laboratoire (**priorité élevée**).

On hésite encore, pour le moment, à soumettre les femmes enceintes à des examens IRM à haute intensité, mais il faut admettre que cette situation pourrait changer. Il serait donc souhaitable de procéder à des études par modélisation sur les courants induits au niveau du fœtus par les mouvements de la mère ou du fœtus lui-même dans un champ de forte intensité. Ces calculs (de même que des travaux similaires sur les gradients de champ et les champs de radiofréquence) permettraient d'évaluer la probabilité d'effets éventuels sur le fœtus (**priorité élevée**).

13.2.2.2 *Etudes in vitro*

Les champs magnétostatiques peuvent interagir avec les systèmes biologiques de différentes manières, encore que les effets à conséquence

sanitaire les plus probables soient imputables à l'action du champ sur les molécules chargées et sur la vitesse des réactions biochimiques.

Il est nécessaire de poursuivre les études sur les cibles des effets biologiques des champs magnétostatiques et sur leur mécanisme. Il est notamment recommandé d'étudier les effets de champs d'une intensité de 0,01 à 10 T sur l'interaction entre les ions (par ex. les ions Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les enzymes et sur la formation de paires de radicaux libres. Sans se cacher la difficulté du problème, il vaut la peine de rechercher s'il y a encore d'autres réactions enzymatiques dont le mécanisme repose sur la formation de paires de radicaux, en se servant pour cela de modèles qui puissent être également valables en santé humaine. On pourrait également se concentrer sur des espèces radicalaires toxiques, comme le radical superoxyde, dont on sait qu'elles produisent des lésions et sont formées selon des mécanismes impliquant des radicaux libres (**priorité moyenne**).

S'agissant de la cancérogénicité éventuelle des champs magnétostatiques, les études faisant état d'un effet co-mutagène sur diverses cellules sont particulièrement intéressantes. Il faudrait effectuer des recherches de ce genre sur des cellules primaires humaines et les étendre à la transformation cellulaire et aux systèmes génétiquement modifiés (**priorité élevée**).

Dans certaines conditions d'exposition, les champs magnétostatiques pourraient affecter l'expression des gènes et les fonctions correspondantes dans les cellules humaines et mammaliennes, mais on ne dispose que de peu de données à ce sujet. Les techniques de la génomique et de la protéomique devraient être appliquées à des cellules primaires humaines afin de rechercher, par la présence éventuelle de marqueurs, la trace d'effets de ces champs susceptibles d'avoir un retentissement sur la santé humaine (**priorité faible**).

13.2.2.3 *Expérimentation animale*

On peut étudier sur des modèles animaux les effets d'une exposition chronique aux champs magnétostatiques. En l'absence d'informations précises sur le pouvoir cancérogène de ces champs, des études de longue durée (notamment sur toute la durée de la vie) sont recommandées. On pourrait travailler à la fois sur des animaux normaux et sur des animaux génétiquement modifiés. Par exemple, si l'on considère que la multiplication des radicaux libres pourrait augmenter le risque de cancérisation, on pourrait utiliser comme modèle des souris privées du gène de la superoxyde-dismutase. Ce modèle présente une sensibilité fortement accrue aux tumeurs et autres pathologies liées à la formation de radicaux libres. L'utilisation de biopuces permet de déterminer et de quantifier sans peine les effets des différents paramètres de l'exposition sur le génome et le protéome (**priorité élevée**).

Il faut étudier de façon systématique la possibilité d'un risque accru d'anomalies du développement et d'effets tératogènes. Il est possible que pendant sa phase de développement, l'encéphale soit particulièrement sensible aux effets de courants induits par les mouvements : les effets d'orientation sont très importants pour guider la croissance normale des dendrites neuronales. Il n'est pas exclu qu'une exposition relativement brève puisse entraîner des modifications persistantes. L'étude des paramètres neurocomportementaux peut permettre d'explorer de façon rapide et sensible les effets d'une exposition sur les fonctions du cerveau en phase de développement, aussi est-il recommandé d'entreprendre de telles études. Il serait également utile de relever systématiquement, pendant cette phase de développement, la présence éventuelle de modifications morphologiques subtiles dans des régions déterminées de l'encéphale comme le cortex et l'hippocampe. On devrait également envisager d'utiliser des modèles transgéniques appropriés (**priorité élevée**).

Même si certaines données indiquent que l'exposition d'animaux (et d'êtres humains) à des champs d'environ 2 T n'entraîne aucun effet physiologique, il serait utile de connaître les effets de champs plus intenses. On pourrait donc étudier avec fruit sur l'animal les effets d'une exposition à des champs dont l'intensité atteint ou dépasse 10 T (**priorité moyenne**).

Divers autres points d'aboutissement de l'effet des champs magnéto-statiques ont été étudiés, mais les résultats obtenus jusqu'ici ne donnent que des informations limitées. Entreprendre une série d'études portant chacune sur l'un de ces points ne serait pas très économique, mais il serait peut-être intéressant de procéder à une expérimentation animale générale couvrant différents points (**faible priorité**).

13.2.2.4 *Expérimentation sur des sujets humains*

Les effets des champs magnétiques sur le comportement et les fonctions cognitives doivent être étudiés plus avant, même si les données disponibles n'indiquent pas l'existence d'un risque particulier pour certains aspects précis des fonctions cognitives et ne permettent guère de savoir quels paramètres seraient à étudier en laboratoire. Faute d'orientation claire, on pourrait éventuellement étudier les effets d'une exposition sur les résultats d'une batterie de tests psychotechniques, comportant notamment des tests classiques d'attention, de temps de réaction et de mémorisation, ne serait-ce que pour procéder à une première sélection dans l'attente de travaux plus pointus. Ce travail expérimental pourrait commencer par des études sur des volontaires (**priorité moyenne**).

Avec la généralisation des examens IRM au cours desquels le personnel technique se trouve à proximité immédiate des malades et des

électroaimants, comme c'est le cas en IRM interventionnelle, il devient nécessaire de procéder à des études complémentaires sur la coordination de la tête et des yeux ainsi que sur les fonctions cognitives et comportementales en présence d'un gradient de champ. On estime qu'il serait d'un grand intérêt d'étudier de manière plus approfondie les mécanismes et l'intensité des troubles vestibulaires provoqués par les champs, notamment les vertiges, car il est de plus en plus probable que le personnel médical va être amené à effectuer des tâches longues et complexes dans un champ magnétique (**priorité élevée**).

De même, il serait utile de poursuivre les études sur la fonction cardiaque ainsi que sur les effets qui pourraient s'exercer sur l'appareil cardiovasculaire. Il pourrait également être nécessaire d'étendre ces études à des champs de plus de 3 T afin d'évaluer les autres types de risque qui pourraient s'ajouter à ceux qui existent dans la pratique clinique habituelle (**faible priorité**).

13.2.2.5 *Etudes épidémiologiques*

Un certain nombre de catégories de travailleurs sont fortement exposées à des champs magnétostatiques, comme par exemple les techniciens d'IRM, les ouvriers des fonderies d'aluminium et certains employés de l'industrie des transports (métro, trains à sustentation magnétique, trains de banlieue et métro léger). Dans le cas de maladies chroniques rares comme le cancer, il est nécessaire d'effectuer des études de faisabilité afin d'identifier les groupes fortement exposés dont on pourrait s'assurer la participation à des études épidémiologiques. Des études de faisabilité sont également nécessaires pour déterminer si ces métiers impliquent d'autres types d'exposition. Si l'on parvient à identifier un nombre suffisant de travailleurs, le mieux serait probablement d'envisager des études cas-témoins imbriquées, car il faut obtenir des données détaillées sur l'exposition et sur les facteurs de confusion importants comme la présence de rayonnements ionisants. Il faudra vraisemblablement organiser des études collectives internationales de manière à disposer d'un nombre suffisant de sujets (**priorité élevée**).

Dans le cas des autres conséquences sanitaires plus courantes à courte période de latence on peut également identifier et suivre longitudinalement les groupes professionnels concernés, par exemple les travailleurs des industries qui fabriquent des appareils d'IRM. Des informations sur un certain nombre d'effets sanitaires pourraient d'ailleurs déjà être tirées des examens médicaux systématiques subis par ces personnels, mais elles ne sauraient être utilisées que si des données analogues concernant des groupes non exposés comparables sont également disponibles. Une enquête sanitaire portant sur des chirurgiens, des infirmières et autres personnels utilisant l'IRM interventionnelle permettrait d'obtenir des renseignements utiles sur le niveau, la durée et la

fréquence de l'exposition des travailleurs aux champs magnétostatiques de ces appareils. De même, les dossiers médicaux que possèdent certains hôpitaux pourraient aussi permettre d'obtenir des données sur des personnes exposées mais dont la pathologie s'est ultérieurement révélée bénigne (**priorité élevée**).

On estime qu'il y aurait également avantage à effectuer une étude prospective sur les risques en cas d'exposition à des champs magnétostatiques pendant la grossesse et à suivre également l'issue de la grossesse chez les femmes qui ont dû subir des examens par IRM (**priorité élevée**).

L'expérience tirée de l'étude d'autres fréquences montre qu'il peut être très difficile d'obtenir une estimation fiable de l'exposition aux champs électromagnétiques qui puisse être utilisée pour des études épidémiologiques et leur substituer d'autres variables comme le nature du travail effectué ou la distance à telle ou telle source ne permet pas toujours une évaluation précise. Il est donc nécessaire d'utiliser un appareillage spécial pour mesurer l'exposition. Des dosimètres personnels relativement peu encombrants se sont révélés très utiles pour les travaux sur les champs électriques de très basse fréquence, aussi l'usage de dosimètres personnels améliorerait-il grandement l'évaluation de l'exposition aux fins des études épidémiologiques. Il conviendrait de procéder à la validation numérique et expérimentale de ces dosimètres. Il faudrait enregistrer l'intensité du champ magnétique, le gradient du champ, la durée de l'exposition et, dans la mesure du possible, la vitesse de variation du champ due aux mouvements (**priorité élevée**).

Tableau 1. Recommandations en vue de la recherche

Mécanismes d'interaction

Chimie des réactions mettant en jeu des paires de radicaux (0,1-10 T)
Effets co-mutagènes sur cellules humaines

Etudes théoriques et informatiques

Etudes dosimétriques sur fantômes voxélisés (homme/ femme/
femme enceinte)
Courants intraoculaires induits
Potentiels d'écoulement myocardiques

Etudes *in vitro*

Mécanismes d'interaction : réactions mettant en jeu des paires de radicaux et activité enzymatique
Influence des paramètres physiques (intensité, durée, répétition, gradient de champ magnétostatique)

Mutagénicité et transformation cellulaire sur cellules humaines primaires
Expression des gènes dans des cellules primaires humaines

Expérimentation animale

Cancer
Effets sur le développement et effets neurocomportementaux
Fonction cardiaque (~ 20 T)

Expérimentation sur des volontaires

Fonction vestibulaire, coordination de la tête et des yeux
Fonctions cognitives et comportement
Effets cardiovasculaires

Etudes épidémiologiques

Etude de faisabilité portant sur les sources d'exposition, les facteurs de confusion et le nombre de sujets exposés
Etude cas-témoins imbriquée portant sur des pathologies chroniques comme le cancer (si réalisable)
Issue de la grossesse après exposition professionnelle ou examen IRM
Etude de cohorte sur les effets à court terme dans les professions fortement exposées
