

Les extrêmement basses fréquences

**Effets sanitaires des champs électromagnétiques
extrêmement basses fréquences**

- Avis de l'Afsset
- Rapport d'expertise collective



AVIS

de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

**Relatif à la « synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des
champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences »**

L'Afsset a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement et du travail et d'évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1336-1 du Code de la santé publique).

Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 25 juin 2008 par les ministères en charge de la santé, de l'environnement et du travail afin de conduire une expertise relative aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Il était notamment demandé à l'Afsset de réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale et de proposer des recommandations afin de mieux quantifier l'exposition de la population à ces champs.

Plus précisément, l'Afsset a été sollicitée pour :

- réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale depuis la publication du rapport du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) intitulé « Champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence et santé » remis à la Direction Générale de la Santé en 2004 ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'étude « Experts » (Exposition des personnes) commanditée par la Direction générale de la santé et menée par l'Ecole supérieure d'électricité (Supélec) en partenariat avec RTE¹ et EDF². Cette étude vise à évaluer l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'enquête citoyenne du Criirem³, menée dans l'ouest de la France ;

¹ RTE : Réseaux de Transport d'Électricité

² EDF : Électricité De France

³ Centre de recherche et d'information indépendantes sur les rayonnements électromagnétiques

• Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

253 av. du Général Leclerc 94701 Maisons-Alfort Cedex

Tél. 01.56.29.19.30 Fax 01.43.96.37.67 Mél afsset@afsset.fr

www.afsset.fr

- établir la contribution des différents équipements et situations à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et faire des recommandations et des propositions afin de mieux quantifier le niveau d'exposition de la population française aux champs électromagnétiques ;
- faire des propositions d'études et de recherches pour améliorer les connaissances scientifiques dans le domaine des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

Contexte

La question de l'impact sanitaire des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences est étudiée depuis plusieurs décennies. La publication, en 1979, d'une étude épidémiologique (Wertheimer et Leeper, 1979)⁴ associant le risque de développement de cancers parmi des enfants dans certains logements du Colorado (États-Unis) avec la présence de réseaux électriques dans leur environnement a été le point de départ de la controverse sur les impacts sanitaires des champs magnétiques basses fréquences. Par la suite, de nombreux travaux ont été publiés dans le monde, aussi bien dans les domaines de l'épidémiologie que des effets des champs *in vitro* et *in vivo*. En dépit d'associations statistiques claires identifiées par plusieurs études entre l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et les leucémies infantiles, aucun mécanisme d'action n'a pu être décrit et aucun lien de cause à effet n'a non plus été clairement identifié. La part d'incertitude qui entoure encore la question concernant les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, en particulier à long terme, alimente les préoccupations et les interrogations du public, focalisées notamment autour des ouvrages de transport d'électricité.

Le classement par le Centre international de recherche contre le cancer (Circ), en 2002⁵, des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (cancérogènes possibles pour l'homme), eu égard à l'excès de risque de leucémies infantiles, a marqué un tournant dans l'expertise des risques sur ce sujet.

Depuis la publication, en 2004, du rapport du CSHPF, d'autres données d'expertise sont parues. En particulier, l'OMS⁶ et le Scenih⁷ ont communiqué des avis scientifiques sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. L'Afsset et l'Inserm ont publié, en 2008, un rapport d'expertise collective sur le thème « cancer et environnement »⁹ qui aborde en particulier le sujet de l'impact sanitaire de ces champs. En France, les travaux de recherche récents ou en cours sur le sujet ont été notamment tournés vers l'amélioration de la mesure de l'exposition et sa prise en compte dans les études épidémiologiques.

Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au Comité d'experts spécialisés (CES) « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine. Suite à un avis favorable du CES, au cours de sa séance du 9 mars 2009, l'Afsset a mandaté des experts rapporteurs pour la réalisation de l'expertise. Les travaux d'expertise de ces rapporteurs ont été soumis au

⁴ Wertheimer N., Leeper E. (1979). *Electrical wiring configurations and childhood cancer*. Am J Epidemiol.; 109(3):273-84.

⁵ IARC. (2002). *Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. Volume 80: Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. 445 p.

⁶ WHO. (2007). *Extremely low frequency fields*. Environmental Health Criteria 238. 543 p.

⁷ Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks

⁸ SCENIHR. (2009). *Health Effects of Exposure to EMF*. Brussels: European Commission, Health and Consumers DG. 83 p.

⁹ *Cancer et environnement*, Éditeur : Inserm et Afsset, Collection : Expertise collective, publié en octobre 2008.

CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les critères de compétence, d'indépendance et de transparence tout en assurant la traçabilité. Les conclusions du groupe d'experts ont été présentées et approuvées lors de la séance du 26 janvier 2010 par le comité d'experts spécialisés.

Avis et recommandations

Conclusions de l'expertise collective

En matière de caractérisation des expositions

Il ressort des études portant sur la mesure de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques basses fréquences publiées ces dernières années ou encore en cours, que la connaissance de cette exposition a progressé. Néanmoins, bien que la nature des sources responsables des émissions soit connue, et même si les moyens métrologiques disponibles permettent aujourd'hui de simuler l'exposition au champ créé par exemple par les lignes de transport d'électricité, l'exposition résultant de ces sources est encore insuffisamment documentée.

On dispose aujourd'hui d'outils de mesure du champ qui permettent de caractériser les émissions des ouvrages de transport d'électricité ou des appareils électroménagers. Par ailleurs, il existe des appareils spécifiques qui permettent de quantifier l'exposition individuelle des personnes aux différentes sources de champ, dans leurs activités quotidiennes. Ainsi, l'étude d'exposition réalisée à Champlan (Essonne)¹⁰ a permis de mettre en œuvre une nouvelle méthode d'investigation de l'exposition individuelle aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences.

L'étude de caractérisation de l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences « Experts » est toujours en cours. Les choix méthodologiques retenus font qu'elle ne pourra donner une représentation exacte des expositions de la population française. Néanmoins, avec 2 000 personnes suivies, elle devrait donner un éclairage tout à fait intéressant sur les expositions réelles et quotidiennes aux champs magnétiques.

En matière d'effets sanitaires

Les effets à court terme des champs extrêmement basses fréquences sont connus et bien documentés, et les valeurs limites d'exposition ($100 \mu\text{T}^{11}$ pour le champ magnétique à 50 Hz, pour le public) permettent de s'en protéger.

Concernant l'hypersensibilité électromagnétique, syndrome très hétérogène, les données actuelles ne permettent pas d'établir de relation de cause à effet avec les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

En ce qui concerne de possibles effets à long terme, il existe une forte convergence entre les différentes évaluations des expertises internationales (organisations, groupes d'experts ou groupes de recherche), qui se maintient dans le temps. Une association statistique entre exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémie infantile a été observée par différentes études épidémiologiques. Ces études montrent même une bonne cohérence entre elles. Elle est statistiquement significative pour une exposition résidentielle, moyennée sur 24 h, à des champs magnétiques dont les niveaux sont supérieurs à 0,2 ou à 0,4 μT , selon les études. Toutefois, à ce jour, les études qui ont été conduites pour déterminer

¹⁰ Étude Ademe – Afsset sur l'exposition individuelle aux champs magnétiques basses fréquences (2006 - 2008).

¹¹ μT : microtesla ; le tesla est l'unité de mesure de l'intensité des champs magnétiques

un mécanisme biologique de cet effet n'ont pas été concluantes. Elles ont porté notamment sur des animaux et sur des systèmes cellulaires humains *in vitro*.

À partir de ces données, le CIRC a classé en 2002 le champ magnétique de fréquences 50 - 60 Hz comme cancérogène possible pour l'homme (catégorie 2B).

Cette incapacité durable à identifier un mécanisme d'action biologique constitue un défi à la compréhension des questions soulevées par les résultats des études épidémiologiques. Cette situation complexe est une motivation pour favoriser la mise en place d'analyses épidémiologiques plus fines avec une meilleure caractérisation de l'exposition.

Aucune relation entre les champs magnétiques extrêmement basses fréquences et des pathologies autres que les cancers n'a été établie. Cependant, l'hypothèse de l'implication de ces champs dans des pathologies neurodégénératives (Alzheimer et sclérose latérale amyotrophique), a été rapportée, notamment dans une méta-analyse traitant des expositions professionnelles (Garcia *et al.*, 2008)¹², et ne peut être écartée.

En matière de valeurs limites d'exposition

L'absence de relation claire entre des niveaux croissants d'exposition et l'augmentation du risque d'apparition d'un effet biologique, les résultats négatifs des études expérimentales, notamment celles conduites chez l'animal, et l'absence de mécanisme d'action plausible, ont conduit l'Icnirp, pour la définition de valeurs limites d'exposition, à s'en tenir aux valeurs basées sur l'induction de courants induits suite à une exposition « aiguë » à un champ électromagnétique. Une proposition de révision des recommandations de l'Icnirp, confirmant les valeurs limites actuelles, a été publiée récemment et est soumise à consultation publique.

L'OMS (OMS, 2007, aide-mémoire n°322), notamment, considère que les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme sont insuffisantes pour justifier une modification des valeurs limites d'exposition. Le groupe d'experts sollicités par l'Afsset partage ces conclusions.

Prise en compte des préoccupations sociales

L'enquête réalisée par le Criirem au voisinage de lignes à haute-tension a été analysée par le groupe d'experts. Elle souffre de nombreux biais (mauvaises conception et gestion du questionnaire, populations étudiées mal définies, mesures des expositions non pertinentes, *etc.*) qui limitent son interprétation et ne permettent pas de valider scientifiquement ses résultats. Elle a cependant le mérite de mettre en lumière les préoccupations sociales liées à l'aménagement de nouvelles lignes de transport d'électricité. Par exemple, elle met en lumière d'importantes questions de la population sur des effets non spécifiques (fatigue, maux de tête, *etc.*). La cause de ces symptômes décrits par les personnes interrogées par le Criirem sera alors difficile à élucider.

¹² García, A.M., Sisternas, A., Hoyos, S.P., (2008). *Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis*. Int. J. Epidemiol. 37(2):329-40.

Recommandations

L'Afsset formule les recommandations suivantes, en s'appuyant sur le rapport du groupe d'expert, ainsi que sur la synthèse d'expertise collective adoptée par le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » :

S'agissant de la caractérisation de l'exposition

Considérant :

- les progrès récents en matière de méthodologie pour la caractérisation de l'exposition (mesure individuelle de l'exposition) et l'intérêt qu'il y aurait à améliorer encore les outils de mesure des champs électromagnétiques existants ;
- la nécessité de définir des protocoles harmonisés de mesure des champs ;
- les connaissances encore limitées de l'exposition des personnes aux sources de champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ;
- la population estimée à environ 350 000 personnes qui pourraient être exposées à des valeurs de champ magnétique supérieures à 0,4 μ T émis par des lignes de transport d'électricité (CSHPF, 2004)¹³ ;
- la réduction limitée des champs magnétiques émis par les lignes de transport d'électricité très haute tension souterraines par rapport aux lignes aériennes ;

L'Afsset recommande, concernant la métrologie des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences :

- de disposer d'un appareil de mesure de référence donnant suffisamment d'informations, en particulier spectrales, pour réduire une partie des aléas potentiellement liés aux études d'exposition effectuées ;
- d'élaborer un protocole de mesure des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans l'objectif de standardiser les méthodes d'évaluation de l'exposition des personnes, notamment à proximité des ouvrages de transport d'électricité ;
- d'encourager les laboratoires d'essais et de métrologie en électromagnétisme à obtenir une accréditation de type COFRAC pour la réalisation de mesures de champs magnétiques basses fréquences ;
- d'étudier la pertinence des indicateurs d'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences disponibles : différents types de moyennes (arithmétique, géométrique, etc.), et de réfléchir à l'intérêt de disposer d'autres indicateurs d'exposition ;
- d'améliorer les appareils de mesure pour les rendre moins coûteux et pour réduire leur encombrement. Cela permettra de cartographier précisément et facilement l'exposition aux champs extrêmement basses fréquences à proximité des sources ;

concernant l'exposition du public :

- de compléter la méthodologie de la mesure de l'exposition dans les lieux de vie de la population étudiée par des mesures directes de l'exposition individuelle réelle, et par des enregistreurs individuels portables ;

¹³ CSHPF (2004). Aurengo, A., Clavel, J., de Seze R., et al. *Champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence et santé*. DGS:61p.

- dans le cadre d'études épidémiologiques ou de caractérisation de l'exposition, de chercher à évaluer l'exposition réelle des personnes aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Il est recommandé de considérer des temps de mesures supérieurs à 24 h, idéalement sur une période d'une semaine et de répéter les mesures en différentes saisons de l'année ;
- de caractériser l'exposition à certains équipements sources de champs non encore étudiés : voiture électrique, etc. ;
- d'encourager les sociétés qui exploitent des réseaux de distribution ou de transport d'électricité à disposer de données consultables de l'exposition aux champs électromagnétiques et les mettre à la disposition des scientifiques ;
- de documenter et affiner, notamment par des mesures, la caractérisation de l'exposition des populations vivant à proximité des lignes de transport d'électricité à très haute tension ;
- de réaliser des mesures d'exposition dans les établissements recevant du public qui accueillent des populations sensibles (femmes enceintes et enfants) à proximité des lignes de transport d'électricité à très haute tension ;
- de documenter les niveaux d'expositions aux autres sources de champs magnétiques extrêmement basses fréquences supérieurs à 0,4 μ T (corridors de transports utilisant l'énergie électrique, etc.) ;
- de transposer en droit français la recommandation européenne de 1999 concernant la limitation de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, notamment concernant les extrêmement basses fréquences, et de l'harmoniser avec les réglementations déjà existantes, dans toute la gamme de fréquences de 0 à 300 GHz ;

concernant l'exposition des travailleurs :

- d'informer les acteurs concernés de l'évolution de la directive européenne 2008/46/CE fixant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) ;
- de fournir une aide technique et scientifique aux entreprises pour la mise en place de la directive européenne 2008/46/CE ;
- d'identifier les situations d'expositions majeures et mineures, notamment dans les petites et moyennes entreprises et caractériser les différentes expositions en fonction des sources ou des activités ;
- pour l'exposition en milieu professionnel, que les industriels intègrent la réduction des expositions aux champs extrêmement basses fréquences dans leurs actions de protection des travailleurs ;
- d'organiser une veille scientifique sur la question de l'exposition et des effets sanitaires éventuels des champs magnétiques extrêmement basses fréquences en milieu professionnel.

Concernant l'urbanisme :

Considérant d'une part, que des associations statistiques ont été trouvées entre l'exposition aux champs extrêmement basses fréquences et les leucémies de l'enfant et d'autre part, que les mécanismes d'action de ces effets n'ont pas été identifiés et que les valeurs limites d'exposition ne peuvent être aujourd'hui recalculées pour prendre en compte des hypothèses d'effets à long terme, l'Afsset estime qu'il est justifié, par précaution, de ne plus augmenter le nombre de

personnes sensibles exposées autour des lignes de transport d'électricité à très hautes tensions et de limiter les expositions.

Cette recommandation peut prendre la forme de la création d'une zone d'exclusion de nouvelles constructions d'établissements recevant du public (hôpitaux, écoles, etc.) qui accueillent des personnes sensibles (femmes enceintes et enfants) d'au minimum de 100 m de part et d'autre des lignes de transport d'électricité à très hautes tensions. Corrélativement, les futures implantations de lignes de transport d'électricité à très hautes tensions devront être écartées de la même distance des mêmes établissements. Cette zone peut être réduite en cas d'enfouissement de la ligne.

L'Afsset remarque que des dispositions législatives et réglementaires ont certes déjà été prises pour limiter les constructions à proximité des lignes de transport d'électricité à très hautes tensions en créant des servitudes d'utilité publique (loi du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains, décret du 19 août 2004), mais celles-ci visent uniquement des considérations de gestion des lignes.

S'agissant des études et recherches sur les effets biologiques et sanitaires des champs extrêmement basses fréquences

Considérant :

- la nécessité de poursuivre les efforts de recherche en matière de connaissance des effets biologiques et sanitaires éventuels des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, dans le contexte de l'existence d'une association statistique épidémiologique identifiée par certaines études entre la leucémie infantile et l'exposition à ces champs, et l'absence de mécanisme d'action biologique identifié ;
- les incertitudes scientifiques persistantes concernant la relation entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et l'augmentation du risque de leucémies infantiles ;

afin de compléter les connaissances scientifiques sur les effets potentiels des champs extrêmement basses fréquences, l'Afsset recommande :

en matière d'épidémiologie :

- de travailler sur les caractéristiques de l'association statistique identifiée avec la leucémie infantile, et de l'approfondir par des études sur des cas particuliers : situations d'expositions importantes, en milieu professionnel ou ailleurs ;
- de systématiser le recours aux méthodes les plus avancées sur la caractérisation de l'exposition et répliquer les études anciennes ;
- de prendre en compte l'impact des expositions multifactorielles (co-expositions à d'autres agents chimiques et/ou physiques) dans les nouvelles études ;
- de rappeler l'importance de réaliser des études comportant des échantillons de taille suffisante et de réaliser des études de faisabilité préalables aux études épidémiologiques de grande ampleur ;
- d'actualiser les méta-analyses existantes sur la leucémie infantile à l'aide des nouvelles données aujourd'hui disponibles ;
- de favoriser l'acquisition de connaissances épidémiologiques sur l'étiologie des leucémies infantiles, en facilitant notamment l'accès aux données administratives indispensables comme le lieu de résidence des parents à la naissance de l'enfant et en

encourageant les dispositifs permettant un recrutement suffisant d'individus sur le plan statistique ;

- de poursuivre et améliorer les travaux concernant les pathologies autres que les cancers (maladie d'Alzheimer et sclérose latérale amyotrophique notamment), en raison du déficit d'information actuel ;

concernant la recherche d'effets biologiques :

- de mieux contrôler les conditions expérimentales permettant d'évaluer les effets biologiques ainsi que la caractérisation de l'exposition des modèles ;
- de développer des recherches sur les conséquences de l'exposition à un champ magnétique extrêmement basses fréquences sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal ;
- de mener des expérimentations avec des expositions animales *in utero* ou du moins précoces dans la vie, prolongées ou répétées dans le temps, autres que les études de tératogénèse et de développement. Les paramètres à étudier doivent être en lien avec le cancer (cancérogenèse, génotoxicité et cytogénétique, etc.), mais aussi avec la leucémie lymphoblastique aiguë ;
- d'encourager l'utilisation de modèles animaux de leucémie lymphoblastique aiguë, notamment par la mise au point des modèles murins transgéniques de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs extrêmement basses fréquences ;
- de réaliser des études qui permettent de comprendre expérimentalement une éventuelle relation causale entre champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémies de l'enfant, d'éventuels mécanismes d'effets co-cancérogènes, de mécanismes de stress oxydatif, etc. ;
- de tester les interactions entre les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et des agents dont la toxicité est établie (agents génotoxiques notamment) en utilisant des protocoles de toxicologie standardisés et une puissance statistique suffisante ;
- de conduire des études visant à vérifier l'existence d'effets synergiques et à déterminer les seuils éventuels pour l'apparition de tels effets.

concernant la compatibilité électromagnétique avec des dispositifs médicaux implantables :

- de mettre en place un recueil systématique d'éventuels incidents qui pourraient affecter les personnes porteuses d'implants médicaux actifs ;

S'agissant de la communication au public sur les effets des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Dans l'attente de la publication de nouvelles études, un effort doit être réalisé pour informer le public sur le risque sanitaire débattu associé à l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. L'action doit porter sur l'état des connaissances et ses évolutions, ainsi que sur les efforts conduits en matière de mesure et de limitation des expositions. À titre d'exemple, l'Afsset recommande :

- de fournir au public une information sur les niveaux de champ magnétique à la fréquence 50 Hz à proximité des ouvrages de transport d'électricité, par le biais de mesures ponctuelles sur site, et par l'intermédiaire d'estimations de l'exposition

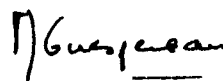
réalisées à partir de données de charge des principales lignes de transport d'électricité, sur le réseau haute-tension B (au-dessus de 50 kV) ;

- de faciliter la réalisation de mesures de champs dans les logements des personnes qui le souhaiteraient ;
- d'envisager la création d'un site internet de vulgarisation sur le sujet des champs extrêmement basses fréquences, qui pourrait proposer notamment de visualiser des mesures de champs couplées à la localisation des lignes de transport d'électricité et favoriserait l'accès des citoyens français aux documents de l'expertise internationale les plus importants ;

d'associer les populations locales aux études de caractérisation de l'exposition, en les impliquant dans la définition des objectifs et en les informant des résultats.

Fait en quatre exemplaires,

Le Directeur général



Martin GUESPEREAU

**Effets sanitaires des champs électromagnétiques
extrêmement basses fréquences**

Saisine n°« 2008/006 »

**RAPPORT
d'expertise collective**

« Comité d'Experts Spécialisés (CES) : Agents Physiques, Nouvelles Technologies
et Grands Aménagements »

mars 2010

Mots clés

Champ électromagnétique, extrêmement basses fréquences, ligne haute tension, effet biologique, effet sanitaire, épidémiologie.

Présentation des intervenants

RAPPORTEURS

M. Alexandre BOUNOUH – Chef de Département au Laboratoire National de Métrologie et d'Essais – Laboratoire de Métrologie Electrique Basse Fréquence – Champs électromagnétiques

M. Henri BRUGERE – Professeur Émérite à l'Ecole Nationale Vétérinaire - Unité Physiologie Thérapeutique - Physiologie

Mme Jacqueline CLAVEL – Directeur de recherche à l'INSERM – Université Paris Sud - Unité d'Epidémiologie environnementale des cancers – Champs électromagnétiques

M. Pascal FEBVRE – Professeur de Physique à l'université de Savoie – Laboratoire Hyperfréquences et Caractérisation – Champs électromagnétiques

Mme Isabelle LAGROYE – Laboratoire de Bioélectromagnétisme (IMS) – Ecole Pratique des Hautes Etudes – Biologie – Champs électromagnétiques

M. Paolo VECCHIA – Directeur de recherche à l'*Istituto Superiore di Sanità* (ISS, Rome, Italie) – Rayonnements non ionisants.

ADOPTION DU RAPPORT PAR LE COMITE D'EXPERTS SPECIALISES

Ce rapport a été soumis pour commentaires au CES :

- Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – 17 décembre 2009 et 26 janvier 2010

Président

M. Jean-François DORÉ – Directeur de Recherche Émérite à l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (Inserm) - Champs électromagnétiques non ionisants – Ultra-violets.

Membres

Fabienne ANFOSSO-LÉDÉE – Ingénieur de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Michel BÉRENGIER – Adjoint au Chef de la division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Jean-Pierre CÉSARINI – Retraité (Directeur du laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine, fondation A. de Rothschild et Inserm) – Ultra-violets.

Jean-Claude COHEN – Coordinateur en biométéorologie à Météo France – Météorologie et santé.

Daniel COURANT – Chercheur, chef de projet au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Rayonnements non ionisants (lasers, ultra-violets).

Frédéric COUTURIER – Responsable du département "Études" à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – Rayonnements non ionisants.

Jean-Claude DEBOUZY – Directeur du département « effets biologiques des rayonnements-biophysique » de l'institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA) – Champs électromagnétiques non ionisants.

Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital Avicenne – Exposition et pathologies professionnelles.

Emmanuel FLAHAUT – Chargé de recherche au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Eric GAFFET – Directeur de recherche *Nanomaterials research Group* au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Martine HOURS – Chargée de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Rayonnements non ionisants.

Agnès JOB – Chercheur au Centre de Recherche du Service de Santé des Armées (CRSSA) – Bruit.

Antoine LABEYRIE – Professeur au Collège de France – Environnement et santé.

Jacques LAMBERT – Directeur de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Bruit.

Dominique LAURIER – Adjoint au chef de laboratoire d'épidémiologie à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) – Epidémiologie.

Olivier LE BIHAN – Ingénieur études et recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Hygiène industrielle et nanomatériaux.

Philippe LEPOUTRE – Responsable du pôle technique auprès de l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (Acnusa) – Bruit.

Didier MARCHAL – Directeur Hygiène Sécurité Environnement (HSE) Europe de la division *Automotive Experience* de Johnson Controls Inc. – Santé au travail.

Annie MOCH – Professeur à l'Université Paris X Nanterre – Bruit.

Philippe PIRARD – Médecin épidémiologiste au Département Santé Environnement à l'Institut national de Veille Sanitaire (IVS) – Epidémiologie.

Serge PLANTON – Ingénieur en chef à Météo France – Météorologie et santé.

Michel RUMEAU – Ingénieur en chef de la section acoustique, adjoint au chef de département de mesures physiques au Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) – Bruit.

René DE SÈZE – Directeur de recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Rayonnements non ionisants.

François TARDIF – Chef de laboratoire au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Sécurité au travail et nanomatériaux.

Michel VALLET – Retraité (Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets)) – Bruit

Paolo VECCHIA – Directeur de recherche à l'*Istituto Superiore di Sanità* (ISS, Rome, Italie) – Rayonnements non ionisants.

Les travaux d'expertise collective ont été adoptés par le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 26 janvier 2010.

PARTICIPATION AFSSET

Coordination scientifique

Mme Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques – Afsset

M. Olivier MERCKEL – Chef de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Afsset

Contribution scientifique

Mme Johanna FITE – Chargée de projets scientifiques – Afsset

Mlle Alexandra GUICHARD – Chargée de projets scientifiques – Afsset

Mlle Myriam SAÏHI – Chargée de projets scientifiques – Afsset

Ressources bibliographiques

Mlle Sophie GUITTON – Chef de l'unité Veille, documentation, archives – Afsset

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – Afsset

AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES

Nom	Affiliation	Audience	Date
Catherine Gouhier Pierre Le Ruz	Criirem - Centre de Recherche et d'Information Indépendantes sur les Rayonnements ElectroMagnétiques	Sous-groupe des rapporteurs	7 octobre 2009
Jacques Lambrozo Isabelle Magne Martine Souques	EDF – Service des études médicales	Sous-groupe des rapporteurs	13 octobre 2009
Hervé Laffaye François Deschamps Olivier Herz	Réseau de Transport d'Électricité (RTE)	Sous-groupe des rapporteurs	29 septembre 2009
Gilles Fleury Isabelle Magne	Responsables de l'étude EXPERS	Sous-groupe des rapporteurs	9 septembre 2009

CONTRIBUTION ECRITE

Le Dr. Anne Cherin a envoyé une contribution écrite en réponse à une sollicitation de l'Afsset, dans le cadre de ses fonctions de médecin du travail à la SNCF et de chargée de mission « champs électromagnétiques » auprès de la direction de l'entreprise.

Sommaire

Présentation des intervenants.....	3
Sommaire	7
EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	9
Liste des figures.....	17
Liste des tableaux.....	18
Abréviations	19
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine	21
1.1 Contexte et objet de la saisine	21
1.2 Modalités de traitement de la saisine	23
1.2.1 Méthode et calendrier de traitement de la saisine	23
1.2.2 Critères de qualité de l'expertise	23
2 Généralités sur les champs électromagnétiques	25
2.1 Nature fondamentale de la source de champ.....	25
2.1.1 Champ électromagnétique.....	25
2.1.2 Champ électrique.....	26
2.1.3 Champ magnétique.....	26
2.2 Grandeurs physiques	27
2.3 Spectre électromagnétique	29
2.4 Sources de champs électromagnétiques	30
2.4.1 Sources naturelles	30
2.4.2 Sources artificielles	31
2.5 Valeurs limites d'exposition et contexte réglementaire	33
2.5.1 Origine des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences pour le public.....	33
2.5.2 Réglementations	35
3 Évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences	37
3.1 Notion d'exposition.....	37
3.2 Méthodes d'évaluation de l'exposition	37
3.2.1 Méthodes indirectes : codes de câblage et calculs	38
3.2.2 Mesures directes.....	38
3.2.3 Méthodes normalisées de mesure des champs électromagnétiques	39
3.3 Analyses des données disponibles sur l'évaluation de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences .	39
3.3.1 Exposition de la population générale.....	39
3.3.2 Exposition des travailleurs	45
3.4 Analyse des études d'exposition récentes ou en cours.....	47
3.4.1 Étude d'exposition à Champlan	47

3.4.2	Étude Expers	52
3.4.3	Enquête citoyenne du Criirem « Vivre avec une ligne THT ».....	56
3.4.4	Mesures de champ réalisées par Supélec.....	60
4	Effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences – synthèse de l'expertise internationale	63
4.1	Rappels méthodologiques.....	63
4.1.1	Les études expérimentales <i>in vivo</i> et <i>in vitro</i>	63
4.1.2	Les études épidémiologiques	63
4.2	Interaction des champs électromagnétiques avec les tissus biologiques	65
4.2.1	Introduction	65
4.2.2	L'action des champs électromagnétiques sur les tissus biologiques	66
4.2.3	Mécanismes indirects impliquant des courants induits.....	66
4.2.4	Mécanismes directs impliquant une cible	68
4.3	Synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.....	68
4.3.1	Choix des publications étudiées	68
4.3.2	Résultats	70
4.3.3	Conclusion sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences	83
5	Conclusion et recommandations	84
5.1	Conclusion.....	84
5.2	Recommandations	85
5.2.1	Caractérisation de l'exposition.....	85
5.2.2	Études et recherches sur les effets biologiques et sanitaires des extrêmement basses fréquences	86
5.2.3	Autres recommandations	87
6	Bibliographie	88
	Annexes.....	94
	Annexe 1 : Lettre de saisine.....	95
	Annexe 2 : Caractéristiques du champ électromagnétique.....	98
	Annexe 3 : Documents relatifs à l'enquête citoyenne du Criirem.....	100
	Annexe 4 : Mécanismes d'action du champ électromagnétique extrêmement basses fréquences	117
	Annexe 5 : Appareils de mesure du champ magnétique	130
	Annexe 6 : Données de mesure Supélec	137
	Annexe 7 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine	165

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences Synthèse de l'expertise internationale

Saisine Afsset n°« 2008/006 »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisés et des rapporteurs.

Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 25 juin 2008 par les ministères en charge de la santé, de l'environnement et du travail afin de conduire une expertise relative aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Il était notamment demandé à l'Afsset de réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale et de proposer des recommandations afin de mieux quantifier l'exposition de la population à ces champs.

Plus précisément, l'Afsset a été sollicitée pour :

- réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'étude Expos (Exposition des personnes), qui vise à évaluer l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'enquête citoyenne du Criirem¹, menée dans l'ouest de la France ;
- établir la contribution des différents équipements et situations à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et faire des recommandations et des propositions afin de mieux quantifier le niveau d'exposition de la population française aux champs électromagnétiques ;
- faire des propositions d'études et de recherches pour améliorer les connaissances scientifiques dans le domaine des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

Contexte scientifique

La question de l'impact sanitaire des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences a été étudiée depuis plusieurs décennies, notamment après la publication en 1979 d'une étude épidémiologique qui a fait date (Wertheimer et Leeper, 1979)², les auteurs associant des cancers développés par des enfants dans certaines habitations du Colorado (États-Unis) avec la présence de réseaux électriques dans leur environnement. Par la suite, de nombreux travaux ont été publiés

¹ Centre de recherche et d'information indépendantes sur les rayonnements électromagnétiques

² Wertheimer N., Leeper E. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol.*; 109(3):273-84.

dans le monde, aussi bien dans les domaines de l'épidémiologie que des effets des champs *in vitro* et *in vivo*. En dépit d'associations statistiques identifiées par plusieurs études entre l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et les leucémies infantiles, aucun lien de cause à effet n'a pu être clairement identifié. La part d'incertitude qui entoure encore la question concernant les effets sanitaires des champs extrêmement basses fréquences, en particulier à long terme, alimente les préoccupations et les interrogations du public, focalisées notamment autour des ouvrages de transport d'électricité. L'impossibilité de la science à démontrer l'absence d'effet sanitaire lié à l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et la publication régulière d'études dont les résultats sont parfois difficilement interprétables nourrissent les incertitudes et les inquiétudes.

La publication par le CIRC en 2002³ du classement des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (cancérogènes possibles pour l'homme), en raison des incertitudes persistantes liées aux études épidémiologiques ayant associé l'exposition à ces champs avec un excès de risque de leucémies infantiles, a marqué un tournant dans l'expertise des risques sur ce sujet.

Depuis la publication en 2004 d'un rapport remis à la Direction générale de la santé (DGS) (DGS, 2004)⁴, d'autres données d'expertise sont parues dans le monde. En particulier, l'OMS⁵ et le Scenih⁶ ont communiqué des positions scientifiques sur cette question des effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. En France, les travaux récents ou en cours sur le sujet ont été principalement tournés vers l'amélioration de la mesure de l'exposition et sa prise en compte dans les études épidémiologiques.

Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine. Le CES, au cours de sa séance du 9 mars 2009, a mandaté des experts rapporteurs pour la réalisation de l'expertise. Les travaux d'expertise de ces rapporteurs ont été soumis au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les critères de compétence, d'indépendance et de transparence tout en assurant la traçabilité.

Description de la méthode

Les experts rapporteurs se sont réunis une première fois le 7 juillet 2009. Cette réunion a permis de préciser les objectifs de la saisine ainsi que de construire l'architecture du rapport. Une

³ IARC. (2002). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 80: Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. 445 p.

⁴ DGS. (2004). Aurengo A., Clavel J., de Seze R., Guénel P., Joussot-Dubien J., Veyret B. Champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence et santé. 61 p.

⁵ WHO. (2007). Extremely low frequency fields. Environmental Health Criteria 238. 543 p.

⁶ SCENIHR. (2009). Health Effects of Exposure to EMF. Brussels: European Commission, Health and Consumers DG. 83 p.

seconde réunion a eu lieu le 27 octobre 2009 pendant laquelle les rapporteurs ont pu prendre connaissance des contributions fournies par chacun.

Les agents de l'Afsset ont par la suite exploité les contributions de chaque rapporteur afin de présenter un rapport au CES « Agents Physiques » répondant à la saisine de ses ministères de tutelle.

Quatre auditions ont été réalisées au cours de l'instruction de cette saisine :

- représentants du projet Experts le 9 septembre 2009 ;
- représentants de RTE (Réseaux de transport électrique) le 29 septembre 2009 ;
- représentants du Criirem le 7 octobre 2009 ;
- représentants d'EDF (Électricité de France) le 13 octobre 2009.

Les recommandations proposées dans le rapport sont issues d'une réflexion collective impliquant les experts rapporteurs, notamment dans le cadre de réunions téléphoniques.

Résultat de l'expertise collective

Le rapport d'expertise propose des généralités sur les champs électromagnétiques, et notamment les champs magnétiques extrêmement basses fréquences, avant d'exposer un recueil des données disponibles en matière de connaissance des expositions à ces champs. Une focalisation est proposée sur 3 études particulières, désignées spécifiquement dans la saisine : le cas de l'étude d'exposition réalisée à Champlan (Essonne) par l'Afsset, l'étude Experts, ainsi que l'enquête réalisée par l'association Criirem. La littérature disponible a été analysée afin de recueillir et synthétiser les données disponibles en matière de champ émis par les diverses sources répertoriées. Au cours des dernières années, des rapports provenant d'organismes internationaux (OMS), et d'institutions nationales (RIVM aux Pays-Bas, HPA et NRPB en Grande-Bretagne) ont été publiés, présentant des données d'exposition de la population aux champs électromagnétiques. Pour compléter ces informations, il a été demandé au laboratoire d'électromagnétisme de Supélec de réaliser des mesures de champs à proximité d'appareils couramment rencontrés dans la vie quotidienne. Les résultats sont présentés à la fin du chapitre consacré aux données d'exposition.

Le quatrième chapitre de ce rapport présente un résumé des connaissances actuelles sur les interactions entre le vivant et les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, ainsi qu'une synthèse de l'expertise internationale sur le sujet, à travers l'analyse des différents rapports disponibles parus depuis 2004.

Enfin, les conclusions et recommandations discutées avec les experts rapporteurs sont présentées en fin de ce rapport.

Le Comité d'Experts Spécialisés « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, lors de sa séance du 26 janvier 2010 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Afsset.

Conclusions et recommandations de l'expertise collective

Conclusions de l'expertise collective

Il ressort des études portant sur la mesure de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques basses fréquences publiées ces dernières années ou encore en cours, que la connaissance de cette exposition a progressé. La nature des sources responsables de ces émissions est connue mais encore insuffisamment documentée et les moyens métrologiques

disponibles permettent par exemple aujourd'hui de simuler l'exposition au champ créé par les lignes de transport d'électricité. Les outils de mesure du champ à disposition aujourd'hui permettent de caractériser les émissions des ouvrages de transport d'électricité ou des appareils électroménagers. Par ailleurs, des appareils spécifiques permettent de quantifier l'exposition individuelle des personnes aux différentes sources de champ, dans leurs activités quotidiennes. Ces outils doivent permettre de mieux évaluer l'exposition des personnes et sa répartition entre les différentes sources, notamment pour améliorer les études épidémiologiques, qu'elles s'intéressent à la population générale ou à des populations professionnelles spécifiques.

L'étude d'exposition réalisée à Champlan a proposé une méthode nouvelle d'investigation de l'exposition individuelle aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences.

L'étude Experts étant toujours en cours, les données disponibles ne permettent pas de se prononcer sur l'ensemble des éléments méthodologiques. Cependant, en raison d'un faible taux de participation, en particulier chez les enfants, l'échantillon retenu n'est pas réellement représentatif de la population française.

L'enquête réalisée par le Criirem souffre d'un nombre important de biais (mauvaises conception et gestion du questionnaire, populations étudiées mal définies, mesures des expositions non pertinentes, etc.) qui ne permettent pas d'interpréter et de valider scientifiquement ses résultats.

En ce qui concerne de possibles effets à long terme, il existe une forte convergence entre les différentes évaluations des expertises internationales (organisations, groupes d'experts ou groupes de recherche), qui se maintiennent dans le temps. Une association entre exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémie infantile, à partir d'une exposition résidentielle moyennée de 0,2 à 0,4 μT , a été indiquée avec une certaine cohérence des études épidémiologiques, mais une interprétation de cette corrélation en termes de cause et d'effet n'est soutenue ni par des études sur animaux ni par des études *in vitro* sur des systèmes cellulaires.

À partir de ces données, le CIRC a classé le champ magnétique de fréquences 50-60 Hz comme cancérogène possible (catégorie 2B). Cette classification repose surtout sur des données épidémiologiques, et l'absence de mécanisme biochimique identifié, notamment, justifie que cet agent physique ne soit pas classé en catégorie supérieure.

L'absence de relation claire entre des niveaux croissants d'exposition et l'augmentation du risque d'apparition d'un effet biologique, les résultats négatifs des études expérimentales, notamment celles conduites chez l'animal, et l'absence de mécanisme d'action plausible, ont conduit l'Icnirp, pour la définition de valeurs limites d'exposition (100 μT pour le champ magnétique à 50 Hz, pour le public), à s'en tenir aux valeurs basées sur l'induction de courants induits. Une proposition de révision des recommandations de l'Icnirp, confirmant les valeurs limites actuelles, a été publiée récemment et est soumise à consultation publique.

Il faut noter que la valeur de 0,4 μT ne peut pas être avancée comme un niveau de risque effectif, au-delà duquel la probabilité de voir survenir des effets sanitaires dommageables serait démontrée. C'est également la position de l'OMS [OMS, 2007, aide-mémoire n°322] qui considère que les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme sont insuffisantes pour justifier une modification des valeurs limites d'exposition.

Aucune relation entre les champs magnétiques extrêmement basses fréquences et des pathologies autres que les cancers n'a été établie, cependant, l'hypothèse de l'implication de ces champs dans les pathologies neurodégénératives (Alzheimer et sclérose latérale amyotrophique) ne peut être écartée.

Recommandations

Caractérisation de l'exposition

Le CES recommande, en matière de métrologie, pour réaliser des évaluations de l'exposition :

- de disposer d'appareils peu coûteux et d'encombrement réduit, dans l'objectif de cartographier précisément de nombreux lieux (dont des lieux fixes avec des dispositifs garantissant une autonomie suffisante) ;
- de disposer d'une méthodologie de référence donnant suffisamment d'informations, en particulier spectrales, pour réduire une partie des aléas des études, en standardisant les méthodologies de mesures, notamment pour les ouvrages de transport d'électricité, mais aussi pour les transports ferroviaires ;
- d'encourager les laboratoires d'essais et de métrologie en électromagnétisme à obtenir une accréditation de type COFRAC pour la réalisation de mesures de champs magnétiques basses fréquences, dans l'objectif de diversifier les acteurs ;
- d'encourager les sociétés qui exploitent des réseaux de distribution ou de transport d'électricité à disposer de données consultables de l'exposition aux champs électromagnétiques.

Concernant l'exposition du public :

- de compléter la méthodologie de la mesure de l'exposition dans les lieux de vie de la population étudiée par des mesures directes de l'exposition individuelle réelle, et par des enregistreurs individuels portables ;
- d'évaluer l'exposition réelle des personnes aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Il est recommandé de considérer des temps de mesures supérieurs à 24 h, idéalement sur une période d'une semaine et de répéter les mesures en différentes saisons de l'année ;
- d'effectuer des mesures en population générale de la contribution des diverses sources à l'exposition globale aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (lignes haute-tension, appareils électrodomestiques, transport, etc.). Le CES recommande également de caractériser l'exposition de certains équipements sources de champs non encore étudiés : voiture électrique, etc.

Concernant l'exposition des travailleurs :

- informer les acteurs concernés de l'évolution de la directive européenne fixant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) ;
- fournir une aide technique et scientifique aux entreprises pour la mise en place de la directive européenne ;
- identifier les situations d'expositions majeures et mineures, notamment dans les petites et moyennes entreprises et caractériser les différentes expositions en fonction des sources ou des activités ;
- organiser une veille scientifique sur la question de l'exposition et des effets sanitaires éventuels des champs magnétiques extrêmement basses fréquences en milieu professionnel.

Études et recherches sur les effets biologiques et sanitaires des champs extrêmement basses fréquences

Afin de compléter les connaissances scientifiques sur les effets potentiels des champs extrêmement basses fréquences, le CES recommande :

En matière d'épidémiologie

- de réaliser des études épidémiologiques ciblées sur des conditions d'expositions particulières : situations d'expositions importantes, milieu professionnel, etc., et qui prennent bien en compte la caractérisation de l'exposition ;
- de prendre en compte l'impact des expositions multifactorielles (co-expositions) ;
- de rappeler l'importance de réaliser des études de faisabilité préalablement aux études épidémiologiques de grande ampleur ;
- de poursuivre les travaux concernant les pathologies autres que les cancers (maladie d'Alzheimer et sclérose latérale amyotrophique notamment), en raison du déficit d'information actuel ;
- d'actualiser les analyses groupées existantes sur la leucémie infantile, et les tumeurs cérébrales, à l'aide des nouvelles données aujourd'hui disponibles.

Concernant la recherche d'effets biologiques

Le CES recommande :

- de mieux contrôler les conditions expérimentales permettant d'évaluer les effets biologiques ainsi que la caractérisation de l'exposition des modèles ;
- de développer des recherches sur les conséquences de l'exposition à un champ magnétique extrêmement basses fréquences sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal ;
- de mener des expérimentations avec des expositions *in utero* ou du moins précoces dans la vie, prolongées ou répétées dans le temps, autres que les études de tératologie et de développement. Les paramètres à étudier doivent être en lien avec le cancer (cancérogenèse, génotoxicité et cytogénétique, etc.), mais aussi avec la leucémie lymphoblastique aiguë ;
- de mener des études permettant de caractériser expérimentalement une relation causale entre champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémies de l'enfant ;
- d'encourager l'utilisation de modèles animaux de leucémie lymphoblastique aiguë ; notamment par la mise au point des modèles murins transgéniques de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs extrêmement basses fréquence ;
- d'étudier de manière approfondie les mécanismes des paires de radicaux dans les cellules immunitaires qui génèrent des espèces radicalaires de l'oxygène dans le cadre de leur fonction phénotypique ;
- de réaliser des études qui permettent de comprendre les éventuels mécanismes d'effets co-cancérogènes ;
- de tester les interactions entre les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et des agents dont la toxicité est établie (agents génotoxiques notamment) en utilisant des protocoles de toxicologie standardisés et une puissance statistique suffisante ;
- de conduire des études visant à vérifier l'existence d'effets synergiques et à déterminer les seuils éventuels pour l'apparition de tels effets.

Concernant la communication du risque

Le CES recommande :

- d'améliorer la connaissance du public sur le niveau d'exposition des personnes aux ouvrages de transport d'électricité, notamment par la mise à disposition de résultats de mesure ;

- d'envisager la création d'un site internet de vulgarisation sur le sujet des champs extrêmement basses fréquences, qui proposerait une cartographie des champs couplée à la localisation des lignes de transport d'électricité et favoriserait l'accès des citoyens français aux documents de l'expertise internationale les plus importants.

Maisons-Alfort, le 26 janvier 2010

Au nom des experts du CES

« Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »,

le président du CES



Liste des figures

Figure 1 : Quelques exemples d'amplitude de champs magnétiques.....	27
Figure 2 : Décomposition du spectre électromagnétique avec quelques applications	30
Figure 3 : Représentation schématique à un instant donné d'une onde électromagnétique plane sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Les champs électrique et magnétique sont toujours perpendiculaires entre eux dans le vide, et perpendiculaires à la direction de propagation.....	30
Figure 4 : Évolution de l'intensité du courant sur un type de ligne à 400 kV de la région parisienne. Source : RTE	32
Figure 5 : Enregistrement pendant 24 h du champ magnétique basses fréquences dans l'environnement d'une personne et identification des sources.....	50
Figure 6 : Enregistrement pendant 24h du champ magnétique basses fréquences en poste fixe dans une habitation située proche de lignes de transport d'électricité.....	51
Figure 7 : Photo et vue éclatée de l'Emdex II.....	130
Figure 8 : Emdex II	131
Figure 9 : Restitution graphique des données enregistrées sur 24 heures environ avec le logiciel Emcalc	132
Figure 10 : EFA 300 Basic Unit	133
Figure 11 : EFA 300 capteur de champ électrique.....	133
Figure 12 : Bobines de Helmholtz	134
Figure 13 : Relation théorique entre le courant circulant dans les bobines de Helmholtz et l'induction créée sur l'axe au milieu des deux bobines.....	134
Figure 14 : Photographies du système d'étalonnage	135
Figure 15 : Position des bobines à l'intérieur de l'Emdex II.....	135

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quelques grandeurs physiques et leurs unités	28
Tableau 2 : Exemples de champs électriques et magnétiques calculés à 50 Hz pour des lignes électriques aériennes [RTE et EDF, 2006].....	40
Tableau 3 : Exemples de champs magnétiques calculés à 50 Hz pour des lignes électriques souterraines [RTE et EDF, 2006].....	41
Tableau 4 : Induction électromagnétique de différents appareils électroménagers.....	43
Tableau 5 : Valeurs de champs magnétiques produits par des équipements en milieu professionnel et mesurés à une distance correspondant à une utilisation courante	46
Tableau 6 : Données issues des enregistrements d'exposition individuelle pendant 24h	49
Tableau 7 : Synthèse des mesures réalisées par Supélec	61
Tableau 8 : Définition du terme « mécanisme » par ses propriétés et ses usages (d'après [Foster, 2003], modifié)	65
Tableau 9 : Conductivité de tissus biologiques (d'après [Gabriel <i>et al.</i> , 1996] et [Foster, 2003])	117
Tableau 10 : Densités de courant induits chez un humain par un champ magnétique de 60 Hz (d'après [Repacholi et Greenebaum, 1999] et [NRC,1997]).....	119
Tableau 11 : Effets internes de l'application d'un champ électrique de 50/60 Hz (d'après [Valberg <i>et al.</i> , 1997])	119
Tableau 12 : Effets internes de l'application d'un champ magnétique de 50/60 Hz (d'après [Valberg <i>et al.</i> , 1997])	119
Tableau 13 : Dépôt d'énergie dans un organisme humain par exposition à un champ électrique ou magnétique, comparé à son métabolisme basal (d'après [Valberg <i>et al.</i> , 1997])	121
Tableau 14 : Forces exercées sur une particule de 0,2 μm du fait de champs E ou H de 50 / 60 Hz (d'après [Valberg <i>et al.</i> , 1997]).....	121
Tableau 15 : Caractéristiques principales de l'Emdex-II	131
Tableau 16 : Tableau d'étalonnage de l'Emdex II	136

Abréviations

ADN : acide désoxyribonucléique

ADSL : *Asymmetrical Digital Subscriber Line* – Ligne d'abonné numérique à débit asymétrique

CERN : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

CES : comité d'experts spécialisés

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer – IARC : *International Agency for Research on Cancer*

CSHPPF : Conseil supérieur d'hygiène publique de France

DGS : Direction générale de la santé

DMBA : diméthylbenzanthrène

EBF : extrêmement basses fréquences – ELF : *extremely low frequencies*

ECG : électrocardiographie

EDF : Électricité de France

EHS : *electrohypersensitivity* – hypersensibilité électromagnétique

ELF : *extremeley low frequencies* – extrêmement basses fréquences

EMF-NET : *electromagnetic-field network* – projet de réseau dans le domaine des champs électromagnétiques (OMS)

EPR : *European Pressurized Reactor* – réacteur pressurisé européen

Expers : projet « EXposition de la PERSonne »

GPS : *Global Positioning System* – système global de positionnement

HR : *hazard ratio* – risque relatif

HSP : *Heat Shock Protein* – protéine de choc thermique

HT : haute tension

HTA (B) : haute tension A (B)

IARC : *International Agency for Research on Cancer* - CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

Incirp : *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

Insee : Institut national de la statistique et des études économiques

LLA : leucémie lymphoblastique aiguë

NK : *natural killer* – cellules tueuses

OMS : Organisation mondiale de la santé – WHO : *World Health Organization*

Opecst : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

OR : *odds ratio*

PCRD : programme cadre de recherche et de développement technologique

RTE : Réseau de transport d'électricité

RIVM : *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* - Institut National pour la santé publique et l'environnement

RR : risque relatif

Scenihl : *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* - Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux

SLA : sclérose latérale amyotrophique

TGV : train à grande vitesse

THT : très haute tension

TWA : *Time Weighted Average* – moyenne temporelle

UKCCS : *United Kingdom Childhood Cancer Study*

WHO : *World Health Organization* – OMS : Organisation mondiale de la santé

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte et objet de la saisine

La question de l'impact sanitaire des champs électromagnétiques basses fréquences a été étudiée depuis plusieurs décennies, notamment après la publication en 1979 d'une étude épidémiologique qui a fait date sur le sujet [Wertheimer et Leeper, 1979]. Wertheimer et Leeper ont noté la présence, dans le Colorado (États-Unis) entre 1976 et 1977, de réseaux électriques qui pouvaient impliquer de forts champs magnétiques dans l'environnement d'habitations dans lesquelles des enfants avaient développé des cancers. Les deux chercheurs ont donc avancé l'hypothèse d'une relation de cause à effet entre un indicateur de l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et l'excès de risque de cancer. Par la suite, de nombreux travaux ont été publiés dans le monde, aussi bien dans les domaines de l'épidémiologie que des recherches d'effets de ces champs *in vitro* et *in vivo*, ou encore de mécanismes d'action biologique. Ces travaux ont donné lieu à des revues d'études, des méta-analyses, et de nombreux rapports d'expertise nationaux ou internationaux. Si la recherche est encore active sur le sujet, elle l'est manifestement moins qu'il y a quelques années, en raison probablement des nombreux résultats négatifs enregistrés. Néanmoins, l'incertitude qui entoure encore cette question des effets sanitaires des champs extrêmement basses fréquences, nourrie notamment par la publication régulière d'études dont les résultats sont parfois difficilement interprétables, alimente les questions et les préoccupations du public, focalisée notamment autour des ouvrages de transport d'électricité.

La publication par le CIRC, en 2002, du classement des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (cancérogènes possibles pour l'homme), en raison des incertitudes persistantes liées aux études épidémiologiques ayant associé l'exposition à ces champs avec un excès de risque de leucémies infantiles, a marqué un tournant dans l'expertise des risques sur ce sujet [IARC, 2002].

L'OMS a régulièrement publié des documents sur la question, réalisant une importante veille scientifique. Le Scenihir s'est également penché sur cette problématique, et a rendu 2 avis, en 2007 et en 2009 ([SCENIHR, 2007] ; [SCENIHR, 2009]).

Sur le plan de la réglementation, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) a proposé en 1998 des valeurs limites d'exposition fondées sur l'analyse complète de la littérature disponible. Ces valeurs limites ont été construites de façon à protéger les populations concernées (public ou travailleurs) des effets connus et avérés des champs électromagnétiques. Cette orientation a été confirmée dans une ébauche de révision des recommandations publiée en 2009. Par conséquent, aucune expertise internationale n'ayant retenu de possibles effets à long terme des champs magnétiques comme avérés, les valeurs limites proposées ne retiennent pour leur calcul que les effets connus à court terme.

Une expérience de gestion de la problématique a eu lieu en Grande-Bretagne ces dernières années, avec la constitution du SAGE (*Stakeholder Advisory Group on extremely low frequency electric and magnetic fields*⁷) en 2004. Ce groupe composé des différentes parties prenantes

⁷ Groupe de réflexion de parties prenantes sur les champs électriques et magnétiques extrêmement basses fréquences.

(experts scientifiques, associations, représentants du gouvernement et de l'industrie) sur la question, a produit un rapport en 2007, incluant des recommandations et des propositions d'action. Il faut noter que ce groupe n'est pas parvenu à exprimer un *consensus* sur la question, mais a néanmoins produit des opinions particulières. Le gouvernement britannique a publié le 16 octobre 2009 ses réponses aux propositions énoncées par le SAGE. Le gouvernement recommande notamment de poursuivre la veille scientifique sur le sujet, l'information transparente du public, ou incite les constructeurs d'équipements électriques à réfléchir au moyen de réduire les champs à des coûts faibles. Par ailleurs, le gouvernement britannique ne se prononce pas en faveur de l'établissement de corridors inconstructibles le long des lignes de transport d'électricité, cette mesure étant jugée disproportionnée par rapport aux données disponibles sur les risques sanitaires potentiels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques concernés.

En France, les travaux récents ou en cours sur le sujet ont été principalement tournés vers l'amélioration de la mesure de l'exposition et de sa prise en compte dans les études épidémiologiques. Ainsi, deux études de caractérisation de l'exposition de groupes de population à l'échelon national (étude Expers) et à l'échelle locale (dans la commune de Champlan, dans l'Essonne) ont été mises en place. Il a ainsi été montré que la mesure de l'exposition des personnes aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans leur environnement et leurs activités quotidiennes pouvait être particulièrement détaillée et utile. Ces études expérimentales laissent entrevoir des progrès dans la caractérisation du lien entre l'exposition aux champs magnétiques et certains effets sanitaires supposés. Par ailleurs, une étude épidémiologique de grande ampleur, Geocap, pilotée par l'Inserm, examine les liens entre l'exposition à de multiples facteurs environnementaux – dont les lignes de transport d'électricité – avec le risque de leucémies infantiles. Des laboratoires continuent également d'explorer les mécanismes ou les effets des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences sur le vivant.

Dans ce contexte, l'Afsset a été saisie le 25 juin 2008 par les ministères en charge de la santé, de l'environnement et du travail afin de conduire une expertise relative aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (Annexe 1). Il était notamment demandé à l'Afsset de réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale et de proposer des recommandations afin de mieux quantifier l'exposition de la population à ces champs.

Plus précisément, l'Afsset a été sollicitée pour :

- réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'étude Expers (Exposition des Personnes) qui a pour objectif de réaliser « une estimation et une caractérisation des expositions de la population française aux champs magnétiques de très basse fréquence » ;
- réaliser une analyse méthodologique de l'enquête citoyenne du Criirem menée dans l'ouest de la France ;
- établir la contribution des différents équipements et situations à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Faire des recommandations et des propositions afin de mieux quantifier le niveau d'exposition de la population française aux champs électromagnétiques ;
- faire des propositions d'études et de recherches pour améliorer les connaissances scientifiques dans le domaine des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

Le présent rapport propose des généralités sur les champs électromagnétiques, et notamment les champs magnétiques extrêmement basses fréquences, avant d'exposer un recueil des données

disponibles en matière de connaissance des expositions aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Une focalisation est proposée sur 3 études particulières : le cas de l'étude d'exposition réalisée à Champlan, l'étude Experts, ainsi que l'enquête réalisée par l'association Criirem. La littérature disponible a été analysée afin de recueillir et synthétiser les données disponibles en matière de champ émis par les diverses sources répertoriées. Au cours des dernières années, des rapports provenant d'organismes internationaux (OMS), et d'institutions nationales (RIVM aux Pays-Bas, HPA, NRPB en Grande-Bretagne) ont fourni quelques données d'exposition de la population aux champs électromagnétiques. Pour compléter ces informations, il a été demandé au laboratoire d'électromagnétisme de Supélec de réaliser des mesures de champs à proximité d'appareils couramment rencontrés dans la vie quotidienne. Les résultats sont présentés à la fin du chapitre consacré aux données d'exposition.

Le quatrième chapitre de ce rapport présente un résumé des connaissances actuelles sur les interactions entre le vivant et les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, ainsi qu'une synthèse de l'expertise internationale sur le sujet, à travers l'analyse des différents rapports disponibles parus depuis 2004.

Enfin, les conclusions et recommandations discutées avec les experts rapporteurs sont présentées en fin de ce rapport.

1.2 Modalités de traitement de la saisine

1.2.1 Méthode et calendrier de traitement de la saisine

L'Afsset a confié au Comité d'experts spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements » l'instruction de cette saisine. Le CES, au cours de sa séance du 9 mars 2009, a mandaté un groupe de rapporteurs pour la réalisation de l'expertise. La composition détaillée de ce groupe figure au début de ce rapport (l'analyse des déclarations publiques d'intérêt figure en annexe 7). Les travaux du groupe de rapporteurs ont été soumis au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par l'Afsset tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Le groupe de rapporteurs s'est réuni une première fois le 7 juillet 2009. Cette réunion a permis de préciser les objectifs de la saisine ainsi que de statuer sur un plan du rapport.

Une seconde réunion a eu lieu le 27 octobre 2009 où les rapporteurs ont pu prendre connaissance des contributions fournies par chacun.

Les agents de l'Afsset ont par la suite exploité les contributions de chaque rapporteur afin de présenter un rapport au CES « Agents physiques » répondant à la saisine de ses tutelles. L'Afsset a par ailleurs réalisé plusieurs auditions au cours de l'instruction de cette saisine :

- les représentants du projet Experts le 9 septembre 2009 ;
- les représentants de RTE (Réseaux de transport électrique) le 29 septembre 2009 ;
- les représentants du Criirem le 7 octobre 2009 ;
- et les représentants d'EDF (Électricité de France) le 13 octobre 2009.

1.2.2 Critères de qualité de l'expertise

Les travaux scientifiques pris en compte dans ce rapport ont fait l'objet d'une publication écrite dans une revue internationale après avis d'un comité scientifique de lecture. La recherche bibliographique a été réalisée par consultation de la bibliographie des rapports internationaux sur le sujet. Les rapports d'études importantes ou de synthèse rendus publics ont également été

analysés. Les communications faites à l'occasion de congrès et colloques ne donnant pas lieu à publication n'ont pas été prises en compte.

Chaque expert a été chargé de rédiger une contribution dans son champ d'expertise, certaines parties ayant fait l'objet d'une concertation entre plusieurs experts.

Les textes ont été soumis à l'appréciation de l'ensemble du CES, les conclusions et les propositions de recommandations ont été rédigées collectivement par les experts rapporteurs et le CES. Elles se sont appuyées sur le poids de la preuve, incluant la qualité scientifique des études, leur réplicabilité et leur cohérence.

Dans le cas où un expert a jugé nécessaire de consulter une personne extérieure reconnue pour ses compétences, la prise en compte éventuelle des informations fournies est à la seule appréciation de l'expert : ces informations ne font pas l'objet de mentions spécifiques dans le rapport.

2 Généralités sur les champs électromagnétiques

2.1 Nature fondamentale de la source de champ

Le champ électromagnétique est associé à l'existence simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Dans le contexte de l'électromagnétisme, le terme « champ » désigne un phénomène susceptible de perturber des objets matériels dans un espace qui, théoriquement, peut être infini, mais qui, dans les faits, est évidemment plus restreint. Le concept de champ est général et permet de rendre compte de manière quantitative des forces qui peuvent s'exercer sur certains objets, particules, ions, atomes, molécules, etc. À l'action de ces forces est associé un échange d'énergie entre l'objet que l'on considère, par exemple la molécule, et son environnement. Le concept de champ permet donc de rendre compte d'échanges d'énergie et de forces exercées à distance, conduisant à des mouvements induits sur un objet. Les champs sont de manière générale des quantités vectorielles, qui se caractérisent par leur amplitude (l'intensité du champ), leur direction et leur sens.

Un exemple de champ aisé à appréhender est le champ de gravitation terrestre, ou champ de pesanteur, qui traduit l'existence d'une force s'exerçant sur tout objet possédant une masse, dirigée vers le centre de la Terre.

2.1.1 Champ électromagnétique

Les champs électromagnétiques sont tout aussi fondamentaux et présents dans la nature que le champ de gravitation. Sur Terre, ces champs sont beaucoup plus intenses que le champ de gravitation car ce sont eux qui assurent la cohésion des atomes entre eux, ce qui permet de constituer des molécules et, de manière générale, la matière, dont celle qui nous compose. Ce sont donc eux qui évitent que chaque molécule dont nous sommes constitués ne tombe sur le sol en raison du champ de pesanteur.

Le champ électrique et le champ magnétique, qui sont les deux composantes du champ électromagnétique, sont d'une manière générale intimement liés et permettent par exemple la propagation des ondes électromagnétiques avec lesquelles nous pouvons communiquer à distance. Ils ont néanmoins des propriétés différentes, qui dépendent en particulier de leur fréquence, c'est-à-dire de la cadence à laquelle leur sens change en fonction du temps (Annexe 2).

Leur origine commune est la charge électrique. La matière est largement composée de particules qui possèdent une charge. Cette charge peut être négative, comme celle des électrons, ou positive, comme celle des protons. Par conséquent, des champs électriques et des champs magnétiques sont générés par la matière vivante. On sait par exemple que les activités cérébrale et cardiaque génèrent des champs magnétiques et/ou électriques⁸ que l'on peut détecter avec des appareils de magnétoencéphalographie ou magnétocardiographie, ou encore en effectuant des électrocardiogrammes.

⁸ de l'ordre de la dizaine de femtoteslas, c'est-à-dire extrêmement faibles.

2.1.2 Champ électrique

Le champ électrique, associé à l'existence d'une charge électrique, exerce son action sur des particules chargées, en mouvement ou non. Un cas particulier de ce champ est le champ électrostatique, considéré pour les fréquences nulles. En toute rigueur, une charge crée un champ électrique en tout point de l'univers. Cependant, ce champ décroît comme l'inverse du carré de la distance r qui sépare la charge qui crée le champ de l'endroit où le champ est mesuré. Il est de plus proportionnel à la charge q qui le crée. Il est généralement noté E et s'exprime en volts / mètre (V/m) : $E = k q / r^2$ où k est une constante. Ce champ permet de quantifier les forces qui s'exercent sur les charges électriques, appelées forces électriques, ou forces de Coulomb⁹. Les effets des champs électriques peuvent être négligés à grande distance car leur intensité décroît rapidement avec la distance¹⁰. Concrètement, le champ et la force électriques sont divisés par 100 si on augmente la distance d'un facteur 10 entre les 2 charges q et Q .

2.1.3 Champ magnétique

Le champ magnétique, associé au mouvement des charges électriques, exerce son action sur des particules chargées en mouvement, ou sur des atomes ou des molécules dotées de « magnétisme¹¹ » du fait de la constitution de leur nuage électronique. Il n'existe pas si les charges sont immobiles. Ainsi, si un champ magnétique existe, un champ électrique existe aussi. C'est pourquoi on parle de champ électromagnétique de manière générale. Par définition, le champ magnétique est directement proportionnel au courant électrique i qui circule à un endroit donné, lui-même associé au mouvement de la charge. Comme pour le champ électrique, son intensité décroît comme le carré de la distance r séparant l'endroit où le courant électrique i se déplace de l'endroit où le champ est mesuré. Le champ magnétique est noté H . Cependant, on utilise souvent la quantité B , appelée induction magnétique ou densité de flux magnétique, pour le quantifier, qui ne diffère du champ H que par une constante de proportionnalité (notée souvent μ). B s'exprime en teslas (T). Pour les mêmes raisons que pour le champ électrique, le champ magnétique décroît rapidement avec la distance et peut généralement être négligé à grande distance.

À titre d'exemple, l'intensité du champ magnétique terrestre, créé par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre, est de l'ordre de 50 μ T en France, dont la plus grande composante est verticale (environ 40 μ T). Ce champ est un champ statique.

⁹ Une charge Q située à la distance r de la charge q subira une force électrique $F_{el} = Q \cdot E$, qui la fera se déplacer dans la direction de q , de la même manière qu'une masse se déplace verticalement dans le champ de pesanteur terrestre. Le signe de la charge a une importance : 2 charges de même signe se repoussent tandis que 2 charges de signes opposés s'attirent. Cette propriété n'existe pas pour le champ de pesanteur puisque les masses négatives n'existent pas.

¹⁰ décroissance en $1/r^2$, c'est-à-dire en fonction du carré de l'inverse de la distance.

¹¹ Magnétisme : en physique, le magnétisme est la propriété de certains minéraux, et des aimants, d'attirer le fer, de s'attirer ou de se repousser entre eux. Historiquement c'est sur la magnétite, un oxyde de fer, que le magnétisme a été découvert. Le magnétisme peut produire des forces d'attraction ou de répulsion entre objets, ou vis-à-vis des charges électriques en mouvement. L'explication du magnétisme se réfère à un mouvement ordonné d'électrons au sein des matériaux. Les phénomènes, réels ou imaginaires, qualifiés de « magnétisme », qui ne relèvent pas de ce type de phénomènes, par exemple le « magnétisme animal », n'ont aucune relation avec ceux qui sont couverts en physique par ce nom ou celui d'électromagnétisme.

Les trois grandes catégories de matériaux peuvent être classés en :

- ferromagnétiques, c'est-à-dire susceptibles de présenter une aimantation de durée variable selon le matériau, présente même en l'absence de champ magnétique extérieur au matériau. Cette aimantation résulte du couplage collectif des *spins* des électrons, orientés tous dans la même direction ;
- paramagnétiques, c'est-à-dire sans aimantation spontanée, mais susceptibles d'acquérir une aimantation lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique ;
- diamagnétiques, qui ne se déplacent pas dans le sens du champ qui leur est imposé, mais se placent de manière perpendiculaire à lui, et présentent une aimantation qui tend à s'opposer au champ magnétique extérieur appliqué.

Cependant, de faibles variations dues à différents phénomènes naturels sont observées en permanence.

Quelques phénomènes à l'origine de champs magnétiques sont présentés sur la Figure 1.

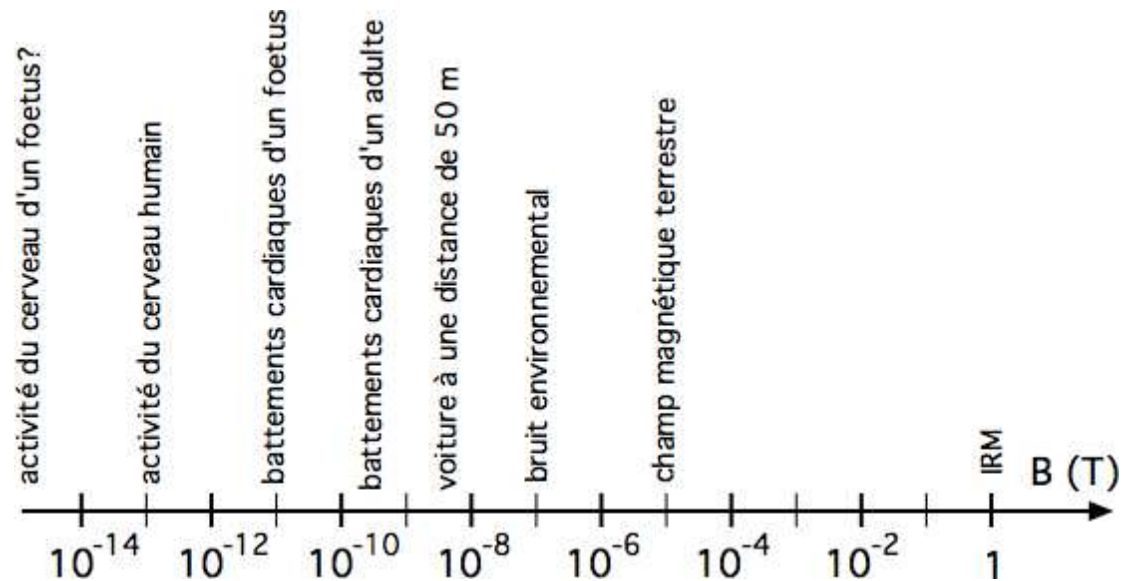


Figure 1 : Quelques exemples d'amplitude de champs magnétiques

2.2 Grandeurs physiques

Le Tableau 1 ci-dessous donne quelques grandeurs physiques utiles, ainsi que les quantités associées qui sont habituellement utilisées.

Tableau 1 : Quelques grandeurs physiques et leurs unités

Grandeur physique (notation)	Unité (symbole)	Autres unités (symbole)
tension électrique (U)	volt (V)	kilovolt (kV) : 1 kV = 1 000 V
courant électrique (I)	ampère (A)	milliampère (mA) : 1 mA = 0,001 A
puissance électrique (P ou P)	watt (W)	kilowatt (kW) : 1 kW = 1 000 W
énergie électrique (W ou W_{el})	joule (J)	kilojoule (kJ) : 1 kJ = 1 000 J
	watt-heure (Wh)	kilowatt-heure (kWh) : 1 kWh = 1 000 Wh
	électronvolt (eV)	kilo-electronvolt : 1 keV = 1000 eV
champ électrique (E)	volt par mètre (V/m)	kilovolt par mètre (kV/m) : 1 kV/m = 1 000 V/m
champ magnétique (H)	ampère par mètre (A/m)	
Induction magnétique (B)	tesla (T) ¹²	millitesla (mT) : 1 mT = 0,001 T
		microtesla (μT) : 1 μT = 0,001 mT
		gauss (G) : 1 G = 10 ⁻⁴ T = 0,1 mT
flux magnétique (Φ ou Φ _B)	weber (Wb)	
fréquence (f ou ν) ¹³	hertz (Hz)	kilohertz (kHz) : 1 kHz = 1 000 Hz
		megahertz (MHz) : 1 MHz = 1 000 kHz
		gigahertz (GHz) : 1 GHz = 1 000 MHz
longueur d'onde (λ)	mètre (m)	micromètre (μm) : 1 μm = 0,000 001 m
		nanomètre (nm) : 1 nm = 0,001 μm
force (F)	newton (N)	piconewton (pN): 1 pN = 0,000000000001 N

On trouve souvent des valeurs de champ magnétique exprimées en teslas, alors qu'il s'agit d'induction magnétique (ou de flux de densité magnétique). Le champ magnétique (H) s'exprime en ampère / mètre, et l'induction magnétique (B) en teslas. Le champ magnétique H et l'induction magnétique B sont reliés, dans un matériau donné, par la relation suivante appelée « constitutive » :

$$B = \mu.H$$

où μ est la perméabilité magnétique du matériau (exprimée en henry / mètre).

¹² Le gauss est une ancienne unité reliée au tesla par la formule suivante : 1 G = 10⁻⁴ T.

¹³ fréquence et longueur d'onde dans le vide : λ (km) $\approx$ 300 000 (m/s) / f (Hz). Par exemple : une fréquence de 50 Hz correspond à une longueur d'onde de 6 000 km.

2.3 Spectre électromagnétique

Une des principales quantités physiques caractérisant les champs électrique et magnétique est la fréquence f à laquelle ces champs oscillent dans le temps. Ces champs peuvent en effet osciller dans le cas où les charges électriques oscillent elles-mêmes dans le circuit qui les transportent. C'est naturellement le cas lorsque les charges circulent par exemple dans une boucle fermée : si on « observait » le mouvement des charges à un endroit donné du circuit, on apercevrait alors un passage périodique des charges. Ces phénomènes oscillants sont présents dans la nature, puisque les atomes sont constitués de noyaux autour desquels orbitent des électrons. Dans le cas général, les fréquences peuvent être très élevées, de l'ordre de 10^{14} Hz par exemple (100 000 milliards d'oscillations par seconde) pour la lumière visible, comme très faibles (par exemple, 0,01 Hz correspond à une oscillation toutes les 100 secondes) pour des phénomènes liés à l'activité de la Terre. La Figure 2 illustre les différentes bandes de fréquences du spectre électromagnétique associées à quelques applications typiques.

Dans le cadre de ce rapport, la gamme des champs extrêmement basses fréquences (champs EBF) considérés est définie par le domaine fréquentiel suivant : $0 \text{ Hz} < f \leq \text{quelques kHz}$.

Dans le cas général, les champs électrique et magnétique constituent le champ électromagnétique et sont liés par les équations de Maxwell, publiées en 1861 par le physicien écossais James C. Maxwell. Lorsque les champs varient dans le temps, étant donné que l'information associée à un déplacement d'énergie ne peut se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière, cela signifie que les champs créés qui se déplacent dans le vide ou l'air à la vitesse de la lumière oscillent dans l'espace. La distance entre 2 points de l'espace pour lesquels le champ a la même valeur est appelée la longueur d'onde λ . Elle est reliée à la fréquence f du signal par $\lambda = c / f$ où c est la célérité de la lumière ($c = 300\,000 \text{ km/s}$). La Figure 3 représente une onde électromagnétique à un instant donné sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Elle est composée, par définition, d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables dans le temps et dans l'espace, liés par les équations de Maxwell. Par exemple, pour une onde de fréquence 50 Hz, la longueur d'onde λ dans le vide vaut 6 000 km.

Une particularité des champs extrêmement basses fréquences, par rapport aux autres domaines du spectre des champs électromagnétiques, est que le champ électrique ou le champ magnétique peuvent exister sous forme isolée l'un de l'autre, à la différence des champs haute fréquence où ils sont liés, justifiant leur qualificatif d'électromagnétiques. Un câble sous tension dont l'intensité du courant qui le parcourt est nulle ou une armature d'un condensateur chargé ne produisent qu'un champ électrique. Un aimant permanent ou un électroaimant excité par un courant continu ne produisent qu'un champ magnétique.

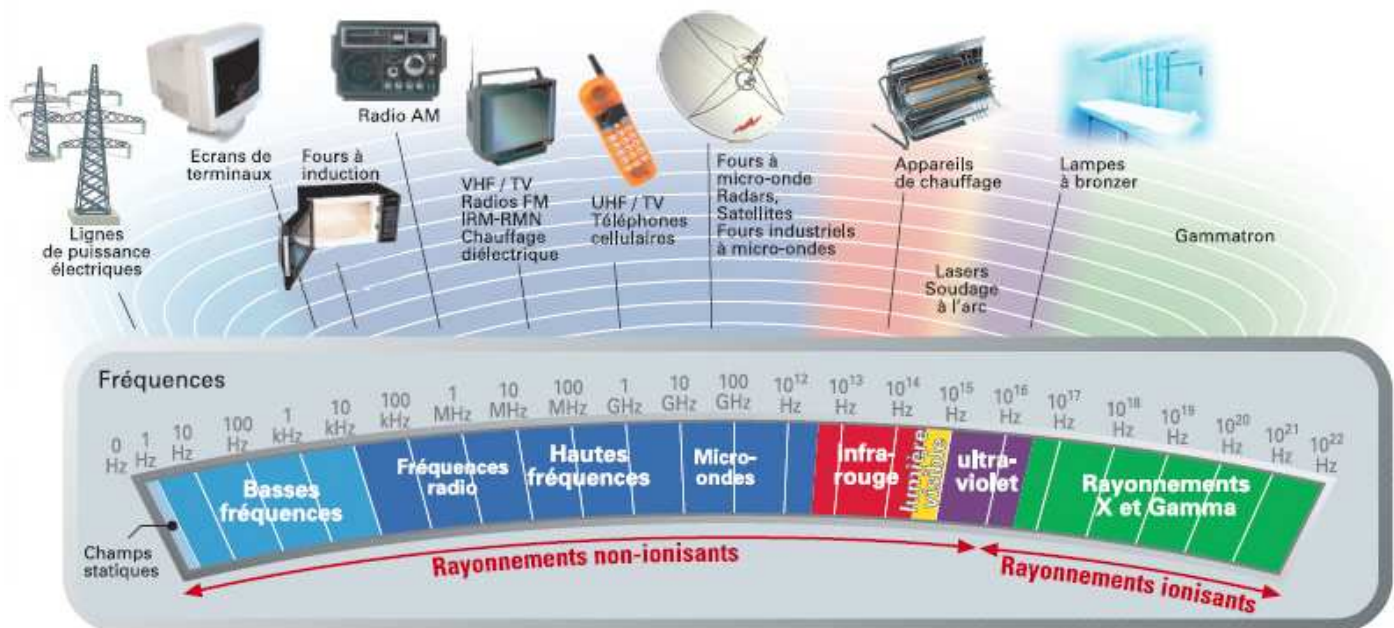


Figure 2 : Décomposition du spectre électromagnétique avec quelques applications

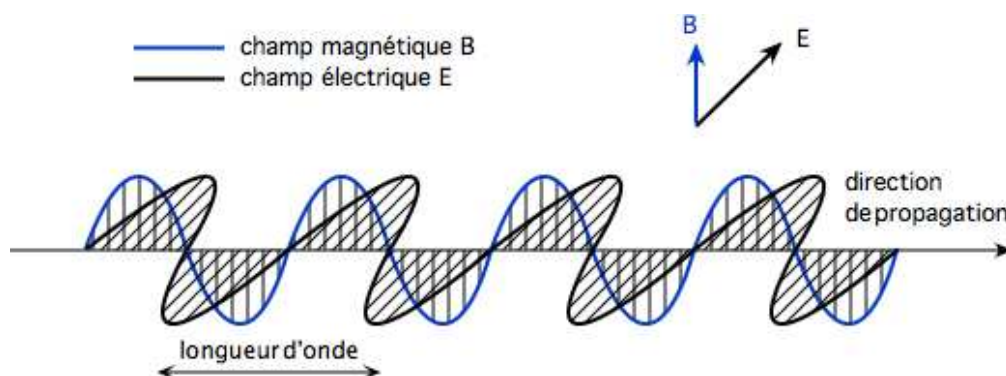


Figure 3 : Représentation schématique à un instant donné d'une onde électromagnétique plane sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Les champs électrique et magnétique sont toujours perpendiculaires entre eux dans le vide, et perpendiculaires à la direction de propagation

2.4 Sources de champs électromagnétiques

Les sources de champ électromagnétique sont diverses et nombreuses. Elles peuvent être naturelles ou artificielles.

2.4.1 Sources naturelles

La source naturelle la plus intense est le soleil, qui produit une onde électromagnétique ayant des fréquences dans l'ensemble du spectre avec un maximum d'intensité dans le domaine visible (dans le jaune puisque le soleil est jaune). L'atmosphère bloque les rayonnements les plus énergétiques (rayons X et γ) dangereux pour la vie, mais aussi, avec l'ionosphère, une partie des rayonnements dans le domaine des ondes radio.

Le champ magnétique terrestre nous protège également des effets nocifs du vent solaire grâce à la magnétosphère située à très haute altitude. Cependant, de nombreux phénomènes

magnétiques naturels sont perceptibles sur Terre, comme celui, spectaculaire, des aurores boréales.

De plus, de nombreux orages recouvrent en permanence la surface du globe, ce qui en fait un système dynamique dans lequel les variations du champ magnétique et du champ électrique dus aux éclairs sont permanentes et variées.

Les gammes de fréquences des différents phénomènes couvrent l'ensemble du spectre radioélectrique. Les intensités dépendent des phénomènes physiques sous-jacents.

2.4.2 Sources artificielles

Il existe aussi des moyens artificiels de créer des champs électriques et magnétiques. La quantité de sources de champ, comme leurs fréquences, sont liées au progrès technique et augmentent avec le temps. Le chapitre 3 présente des données d'exposition humaine à de nombreuses sources de champs électromagnétiques, dont les principales caractéristiques techniques sont décrites ci-dessous.

2.4.2.1 Lignes de transport et de distribution d'électricité

Le transport et la distribution de l'électricité en France sont gérés par deux entités : RTE pour le transport de la haute tension B (tensions supérieures à 50 kV, jusqu'à 400 kV), et ERDF pour la distribution de la moyenne tension (haute tension A), comprise entre 1 kV et 50 kV. Sous l'appellation générique de « Ligne 400 kV », il existe en réalité une grande variété de configurations. En effet, toutes les lignes n'ont pas la même fonction dans le réseau et vont donc avoir des courbes de charge, c'est-à-dire de transit de courant, très différentes :

- ainsi, une ligne d'évacuation de centrale nucléaire aura une courbe pratiquement constante dans le temps, la production de la centrale étant relativement constante ;
- une ligne d'évacuation de barrage hydraulique aura au contraire une courbe très hachée avec des valeurs très faibles (voire nulles) la plupart du temps et quelques pics lorsque le barrage fonctionne, pour faire face notamment à des besoins ponctuels ;
- enfin, une ligne d'alimentation d'une ville aura un transit très cyclique, suivant plusieurs modalités : jour / nuit, semaine / *week-end*, été / hiver, *etc.*

En ce qui concerne l'intensité de courant qui parcourt la ligne, on définit trois notions :

- l'intensité maximale (ou encore intensité nominale) qui est l'intensité admissible en permanence sur la ligne (IMAP). Cette valeur dépend de la température extérieure et donc de la saison ;
- l'intensité moyenne qui est égale à environ 1/3 de l'intensité maximale ;
- l'intensité en régime de service permanent, normalisée, qui correspond à une intensité conduisant à une température de 40°C dans les conducteurs. Cette intensité est rarement dépassée (moins de 5 % du temps) et correspond à environ 2/3 de l'intensité maximale.

La Figure 4 montre deux exemples de courbes journalières de charge pour une ligne de 400 kV de la région parisienne. On observe sur ces deux courbes une saisonnalité marquée avec une intensité hivernale très supérieure à celle de l'été. Les deux courbes reproduisent également des

variations marquées entre le jour et la nuit, cependant les maximum journaliers correspondant au début (8h) et à la fin de la journée (19h) sont plus marqués en hiver. On note un pic ponctuel à 16h le 21 juin qui, selon RTE, correspond à un incident du réseau sur une ligne voisine, qui a conduit à un report temporaire de charge. La remontée de consommation à 22h est normale et correspond au passage en heures creuses, heure à laquelle de nombreux chauffe-eau électriques en France sont mis en marche.

Evolution du transit sur 24H

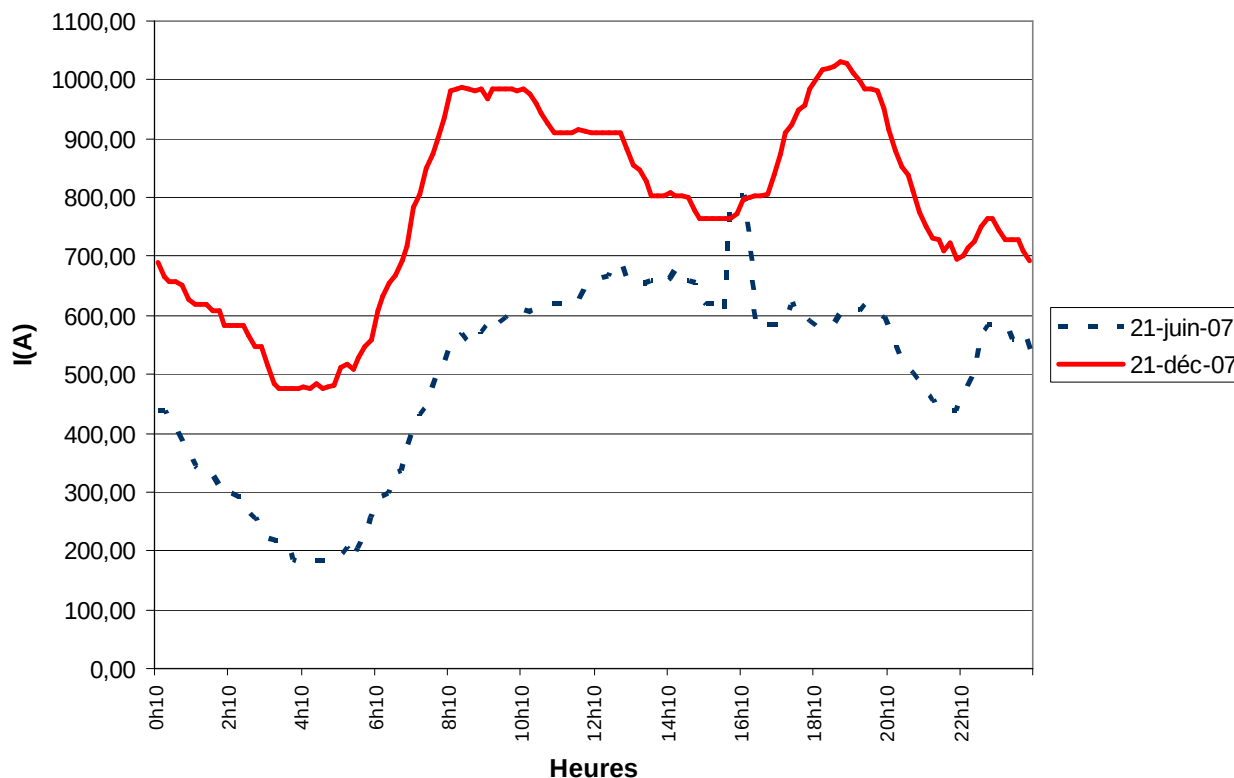


Figure 4 : Évolution de l'intensité du courant sur un type de ligne à 400 kV de la région parisienne.
Source : RTE

Le champ magnétique émis par les réseaux de transport et de distribution d'électricité est proportionnel à l'intensité du courant circulant dans les câbles. Il est par ailleurs inversement proportionnel au carré de la distance aux câbles (décroissance en $1/d^2$, si d représente la distance au câble). Dans cette famille, les réseaux torsadés (réseaux isolés 380 V et câbles 20 kV) constituent un cas particulier. Leur disposition en torsade réduit le champ magnétique à un niveau pratiquement négligeable.

2.4.2.2 Les trains, métros et tramways

Les champs électromagnétiques générés par le système ferroviaire français sont de deux types :

- des champs magnétiques statiques créés par un système d'électrification à courant continu, sous une tension de 1 500 V, par exemple pour les réseaux de trains du Sud-est et du Sud-ouest ;
- des champs électromagnétiques très basses fréquences générés par un système d'électrification à courant alternatif de 50 Hz sous une tension de 25 kV, pour les lignes de trains à grande vitesse et/ou longue distance.

À titre d'information, un autre système est utilisé pour les réseaux de métros et certaines lignes ferroviaires secondaires. Il s'agit d'une alimentation en courant continu de 750 à 800 V environ, avec captage par un troisième rail pour les métros. L'alimentation des tramways peut se faire de plusieurs façons. En France, il s'agit d'une alimentation aérienne par caténaire ressemblant à celle des trains. Le courant utilisé est continu et compris entre 600 et 750 V. On peut noter que quelques villes sont équipées de tramways fonctionnant avec des batteries.

2.4.2.3 Les appareils électroménagers

Pour les appareils électroménagers, les champs électromagnétiques créés sont localisés. Ils sont très variables et dépendent de la technologie de l'appareil. Ils ne sont généralement pas proportionnels au courant consommé. Ils sont inversement proportionnels au cube de la distance ($1/d^3$), ce qui les rend rapidement négligeables, habituellement au-delà de deux mètres. Les champs produits par ce type d'appareil est composé du champ magnétique à 50 Hz, lié à l'alimentation électrique, mais aussi du champ à d'autres fréquences proches, jusqu'à quelques kHz, lié aux divers composants de l'appareil (moteurs, etc.).

2.4.2.4 Sources en milieu professionnel

Les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences sont également présents dans l'environnement professionnel. Dans le monde du travail, les sources d'exposition sont de plus en plus nombreuses et de plus en plus répandues : écrans d'ordinateurs, équipements de soudage, électrolyseurs, lignes de transports électriques, transformateurs, alternateurs, fours de fusion, fours de vulcanisation, chauffage par induction, etc.

2.5 Valeurs limites d'exposition et contexte réglementaire

2.5.1 Origine des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences pour le public

2.5.1.1 Valeurs limites internationales d'exposition aux champs électromagnétiques

Des instances internationales, en particulier l'Icnirp (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* - Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants), proposent des recommandations d'exposition dont les limites sont très inférieures aux seuils d'exposition entraînant des effets par stimulation des tissus électriquement excitable (facteur 10 à 50 au-dessous de ces seuils, respectivement pour les professionnels et le public). Ils visent donc à prévenir ce type d'effets sanitaires. Ces recommandations, publiées en 1998 [ICNIRP, 1998], sont actuellement en cours de révision pour les champs magnétiques extrêmement basses fréquences. Une ébauche des nouvelles recommandations a été publiée sur le site de la Commission, pour commentaires ouverts à tous. La publication finale est prévue pour les premiers mois de 2010.

2.5.1.2 Valeur limite d'exposition pour les champs extrêmement basses fréquences

En se basant sur les travaux de l'Icnirp, la recommandation du Conseil de l'Union européenne 1999/519/CE du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) [CCE, 1999] conseille des valeurs limites d'exposition pour le public « afin d'offrir à tous les citoyens de la Communauté un niveau élevé de protection ». La valeur limite recommandée de 100 μ T a été établie à partir des réponses biologiques d'une exposition « aiguë » à un champ électromagnétique. Elle vise à prévenir les effets des courants induits dans l'organisme par un champ électromagnétique extrêmement basses fréquences sur les cellules excitable du système nerveux central au niveau de la tête et du tronc. Dans la mesure où aucune relation stricte de cause à effet associant l'exposition à long terme aux champs électromagnétiques à des pathologies n'a pu être démontrée, pour des niveaux inférieurs à ceux

évoqués précédemment, la recommandation de 1999 propose des valeurs limites d'exposition « instantanées » mais pas de valeurs spécifiques pour des expositions à long terme.

Cette valeur limite d'exposition est un niveau seuil de protection de la santé et non un seuil de dangerosité. Elle a reçu l'aval de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

2.5.1.3 Effets potentiels d'une exposition chronique

Certaines études épidémiologiques rapportent une augmentation significative du risque de leucémie chez l'enfant à partir d'une exposition résidentielle moyennée de 0,2 à 0,4 μ T. Cependant, la manque de vérification de ces résultats par les études expérimentales, notamment celles conduites chez l'animal, et l'absence de mécanisme d'action plausible, ont conduit l'Icnirp, pour la définition de valeurs limites d'exposition, à s'en tenir aux valeurs basées sur les effets aigus, liés à l'induction de courants électriques dans le corps : « Dans l'ensemble, contrairement à la preuve épidémiologique d'une association entre la leucémie infantile et l'exposition prolongée aux champs magnétiques aux fréquences du réseau électrique, les données de cancer chez les animaux, en particulier celles des études de grande ampleur sur toute la durée de vie, sont quasi-unaniment négatives. Les données provenant d'études cellulaires sont généralement en faveur de cette opinion, quoique plus équivoques. [...] Le point de vue de l'Icnirp est que les preuves scientifiques actuelles appuyant l'hypothèse que les champs magnétiques EBF soient associés de manière causale à la leucémie infantile sont trop faibles pour constituer la base de l'établissement des lignes directrices d'exposition»¹⁴ [ICNIRP, 2009].

À partir de ces données épidémiologiques, le CIRC a classé le champ magnétique de fréquences 50-60 Hz comme cancérogène possible (catégorie 2B) [IARC, 2002].

Cette classification repose donc sur des données épidémiologiques seules, et l'absence de mécanisme biochimique identifié, notamment, justifie que cet agent physique ne soit pas classé en catégorie supérieure. Cette question de la classification par le CIRC des champs magnétiques extrêmement basses fréquences parmi les agents cancérogènes possibles a suscité des débats dans la communauté scientifique. Ainsi, pour L. Kheifets, « les études épidémiologiques ne fournissent pas de justification pour fixer des valeurs limites d'exposition à 0,3 et 0,4 T ou à des niveaux plus bas » [Kheifets *et al.*, 2005].

Compte tenu des incertitudes méthodologiques, de l'absence, à ce jour, de mécanisme d'action plausible, de la négativité des principales études chez l'animal, les valeurs de 0,3 ou 0,4 μ T ne peuvent pas être avancées comme un niveau de risque effectif, au-delà desquelles la probabilité de voir survenir des effets sanitaires dommageables serait démontrée. C'est également la position de l'OMS [OMS, 2007, aide-mémoire n°322] qui considère que les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme sont insuffisantes pour justifier une modification des valeurs limites d'exposition.

¹⁴ "Overall, in contrast to the epidemiological evidence of an association between childhood leukemia and prolonged exposure to power frequency magnetic fields, the animal cancer data, particularly those from large-scale lifetime studies, are almost universally negative. The data from cellular studies are generally supportive of this view, though more equivocal. [...] It is the view of ICNIRP that the currently existing scientific evidence that ELF magnetic fields is causally associated with childhood leukemia is too weak to form the basis for exposure guidelines"

2.5.2 Réglementations

2.5.2.1 Valeurs limites d'exposition applicables en France et à l'international

2.5.2.1.1 Population générale

À ce jour, une trentaine de pays ont adopté ou recommandé les valeurs limites de l'icnirp, basées sur l'induction des courants induits. Ainsi, la valeur limite d'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences de 100 μ T a été adoptée dans une majorité de pays en Europe, ainsi que dans d'autres pays en Afrique et en Asie. En France, il n'existe pas de cadre réglementaire strict appliquant la recommandation du conseil de l'Europe pour les extrêmement basses fréquences.

Certains pays ont, eux, adopté des valeurs limites plus restrictives dans un cadre particulier. C'est le cas notamment des Pays-Bas [Kheifets *et al.*, 2005], qui ont adopté une valeur moyenne de 0,4 μ T à ne pas dépasser à proximité des nouvelles constructions à usage sensible (logements, écoles, crèches et garderies).

En Suisse également, une ordonnance sur la protection contre les rayonnements non ionisants (février 2000) a limité, à titre de précaution, les expositions dues aux installations fixes à 1 μ T (en valeur moyenne sur 24 heures) dans « les lieux à utilisation sensible » tels que les logements, les hôpitaux, les écoles, les bureaux et les aires de jeu. Le texte mentionne notamment que « les valeurs limites de l'installation ne reposent pas sur des connaissances médicales ou biologiques mais ont été fixées en fonction de critères techniques, économiques et d'exploitation ».

Enfin, l'Italie, à partir des limites d'exposition issues de la recommandation européenne – valeurs à ne jamais dépasser – a défini à titre de mesure de précaution, des « valeurs d'attention » de 10 μ T pour les zones où le public demeure plus de 4 heures par jour et, dans ces mêmes zones, des « objectifs de qualité » de 3 μ T qui sont à atteindre à moyen terme pour les nouvelles lignes et les nouvelles constructions (arrêté du 8 juillet 2003). Dans ces cas, il s'agit de la moyenne des valeurs enregistrées pendant 24 heures.

Toutes ces dispositions visent un « surcroît » de protection pour le public. Leur diversité illustre la complexité de l'approche, ainsi que l'absence de données scientifiques suffisamment fondées pour établir une politique commune basée sur la science et non sur des choix arbitraires.

2.5.2.1.2 Travailleurs

L'Union européenne a promulgué une directive pour la protection des travailleurs vis-à-vis de l'exposition aux champs électromagnétiques. Comme pour la recommandation européenne, elle reprend l'approche et les valeurs limites de l'ICNIRP. Cette directive, qui couvre elle aussi toute la gamme des rayonnements non ionisants (de 0 à 300 GHz), précise les valeurs limites d'exposition dont le respect « garantira que les travailleurs exposés à des champs électromagnétiques sont protégés de tout effet nocif connu sur la santé ».

Dans la gamme de fréquences qui nous intéresse, à 50 Hz, la « valeur déclenchant l'action » (à partir de laquelle il faut prendre une ou plusieurs des mesures prévues par la directive) est de 500 μ T.

La Commission, lors de la présentation de sa proposition de modification de la directive 2004/40/CE s'est engagée à consulter les partenaires sociaux. Cette proposition a été adoptée le 23 avril 2008 et est devenue la directive 2008/46/CE du Parlement européen et du Conseil, ce qui a eu pour effet de prolonger le délai de transposition de la directive 2004/40/CE par les États membres jusqu'au 30 avril 2012. La Commission procède actuellement à une évaluation de la situation. L'adoption de la nouvelle directive 2008/46/CE était motivée par l'existence de problèmes d'application liés à certaines valeurs limites d'exposition. Il est possible qu'une modification substantielle de la directive 2004/40/CE s'impose, en tenant compte de facteurs spécifiques tels que les actes médicaux faisant appel à l'imagerie par résonance magnétique

(IRM) ainsi que les résultats des dernières recherches et de l'évolution technique, tout en assurant un niveau approprié de protection de la santé et de la sécurité des travailleurs concernés.

2.5.2.2 Textes réglementaires spécifiques aux ouvrages de transport d'électricité applicables en France

L'arrêté du 17 mai 2001 modifié par l'arrêté du 26 janvier 2007 (et les arrêtés précédents qui continuent de s'appliquer à certains ouvrages, notamment ceux du 2 avril 1991, du 26 mai 1978, du 13 février 1970, du 30 avril 1958 et du 30 avril 1951) fixent les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique.

Concernant la distribution d'énergie, le législateur, soucieux de prendre en compte la croissance des exigences sociales en matière d'environnement et de cadre de vie, a ajouté un article 12 bis (loi du 13 décembre 2000) à la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie, permettant au préfet de département d'instituer au voisinage de lignes électriques aériennes de tension supérieure ou égale à 130 kV (existantes ou à construire) des servitudes limitant ou interdisant certaines constructions ou utilisations du sol, sans lien avec des questions sanitaires.

Dès lors que le préfet institue de telles servitudes, la construction ou l'aménagement de bâtiments d'habitation, d'aires d'accueil des gens du voyage et d'une liste limitative d'établissements recevant du public (structures d'accueil pour personnes âgées, hôtels, établissements scolaires, sanitaires, pénitentiaires ou de plein air) deviennent automatiquement interdits, dans un périmètre laissé à l'appréciation du préfet mais dont la surface maximale est fixée pour les lignes à 400 kV à 15 m de part et d'autre de l'emprise au sol des lignes et le rayon maximal du cercle autour des pylônes à 40 m.

En outre, le préfet peut décider que seront interdites ou bien assujetties à des prescriptions particulières, les établissements recevant du public autres que ceux énoncés ci-dessus et certains types d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Les propriétaires concernés conservent toujours la possibilité de réaliser des travaux d'adaptation, de réfection ou d'extension des constructions existantes, dès lors que la capacité d'accueil d'habitants ne s'en trouve pas significativement accrue.

Dans le domaine électrique, l'arrêté technique du 17 mai 2001 reprend les limites de 5 000 V/m et de 100 μ T pour tous les nouveaux ouvrages, et dans les conditions de fonctionnement en régime de service permanent.

Le décret n° 2004-835 du 19 août 2004 précise les conditions d'application de ces servitudes autour des ouvrages de transport d'électricité.

3 Évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Pour évaluer les effets des champs électromagnétiques sur la santé, il est nécessaire de disposer de méthodes pour estimer l'importance de l'exposition réelle des personnes et d'identifier les paramètres pertinents de cette exposition. Cependant, la connaissance de l'exposition du public est très difficilement accessible et repose généralement sur des estimations indirectes (codage, calculs), plus rarement sur des mesures réelles qui permettent de mieux quantifier l'exposition. Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes méthodes utilisées pour évaluer l'exposition des personnes aux champs extrêmement basses fréquences, ainsi qu'une analyse des données disponibles sur l'exposition des populations, en particulier pour la population française.

3.1 Notion d'exposition

La notion d'exposition est utilisée aussi bien pour caractériser l'intensité du rayonnement électromagnétique reçu par les personnes, par exemple dans le cadre d'études d'exposition individuelle ou d'études épidémiologiques, que pour des modèles animaux ou cellulaires dans le cadre d'études biologiques qui cherchent à identifier des effets. Il est question d'exposition « aiguë » lorsque la durée de l'exposition est courte (quelques minutes à plusieurs heures selon le modèle) et d'exposition « chronique » lorsque cette durée s'étale pendant une grande partie de la vie de l'animal ou de l'humain.

Compte tenu de la durée de vie d'un rat ou d'une souris, une exposition de 1 an ou deux est considérée comme chronique. Entre les deux, pour quelques jours à quelques mois, l'exposition est dite semi-chronique (ou subchronique).

S'il s'agit de cellules en culture, ces notions de chronique ou semi-chronique sont difficilement transposables, néanmoins, il est question d'exposition aiguë pour quelques minutes ou quelques heures, et chronique ou de longue durée si l'exposition persiste durant plusieurs générations de cellules.

3.2 Méthodes d'évaluation de l'exposition

Les estimations de l'exposition aux champs électromagnétiques peuvent être basées sur des méthodes dites indirectes à partir d'un codage ou de calculs, mais également à partir de mesures réelles effectuées soit à poste fixe à l'intérieur des habitations, soit en équipant les personnes d'enregistreurs portables. Dans tous les cas, il est très important d'analyser les méthodes de caractérisation de l'exposition pour tenir compte de sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

Dans l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques, il est important de définir les paramètres *ad hoc* qui peuvent lier l'exposition à l'impact sur la santé. En effet, on peut évaluer plusieurs paramètres tels que l'exposition moyenne pondérée (*Time Weighted Average* ou TWA) qui est la moyenne pondérée des mesures d'exposition sur une période qui prend en compte l'intervalle de temps entre deux mesures [Preston-Martin *et al.*, 1996], la moyenne arithmétique, la

moyenne géométrique¹⁵ ou la médiane de ces valeurs ([London *et al.*, 1991] ; [Vistnes *et al.*, 1997]). On peut également mesurer les pics d'exposition, la durée d'exposition au-delà d'un certain niveau de champ ou encore les variations rapides de flux magnétique. Il s'agit donc de définir les paramètres qui vont refléter le mieux un possible effet biologique des champs électromagnétiques.

L'évaluation de l'exposition de la population doit aboutir à la connaissance de la proportion de la population qui est exposée à une valeur donnée d'un paramètre lié au champ électromagnétique et à la connaissance de l'origine de cette exposition. Elle constitue par ailleurs un des éléments importants d'appréciation et de gestion du risque sanitaire potentiel. L'évaluation de l'exposition doit donc par exemple permettre de donner le nombre de personnes exposées et leur répartition en âge ainsi que les caractéristiques des sources de champs élevés.

3.2.1 Méthodes indirectes : codes de câblage et calculs

L'approche basée sur un code de câblage (*wire codes*) permet de classer un logement en fonction de sa distance à un type particulier de source de transport de courant ([Wertheimer et Leeper, 1979] ; [Kaune et Savitz, 1994]). Cette méthode reste indicative de l'exposition puisqu'elle ne considère que les champs magnétiques générés par le système de distribution « visible » de l'électricité et ne prend pas en compte les sources à l'intérieur de l'habitation. On peut également procéder au calcul du champ magnétique généré par les lignes électriques connaissant leurs caractéristiques géométriques et les courants qui y circulent ([London *et al.*, 1991] ; [Feychting et Ahlbom, 1993] ; [Vistnes *et al.*, 1997]). Les résultats de ces calculs sont parfaitement en cohérence avec les mesures. Cependant, la validité de cette approche pour déterminer l'exposition reste limitée par l'absence d'information sur le temps d'exposition des sujets. Un autre moyen d'estimation de l'exposition est le calcul du champ magnétique produit par une ligne en utilisant l'historique de sa charge [McBride *et al.*, 1999]. L'exposition cumulée est alors évaluée indirectement en multipliant le nombre de mois d'exposition par le niveau moyen du champ magnétique calculé. Les données sont affinées au moyen d'un questionnaire ou journal d'activité que les sujets doivent renseigner.

3.2.2 Mesures directes

L'exposition aux champs électromagnétiques peut être estimée à partir de mesures en des lieux donnés (chambre, séjour, salle de jeux, école, *etc.*). On procède alors à des mesures en ces points fixes, soit ponctuelles dans le temps et de courte durée, soit en continu sur 24 ou 48 heures, qui sont plus représentatives de l'exposition ([Schoenfeld *et al.*, 1999] ; [Dockerty *et al.*, 1998]). En effet, il a été démontré une forte corrélation entre la mesure fixe faite en continu et la valeur enregistrée avec les enregistreurs portatifs individuels [Friedman *et al.*, 1996].

L'exposition peut également être mesurée directement à l'aide de mesures individuelles en utilisant des magnétomètres portatifs qui permettent de mesurer les champs magnétiques auxquels les sujets sont exposés ([McBride *et al.*, 1999] ; [Schoenfeld *et al.*, 1999] ; [Eskelinen *et al.*, 2002]). Il est à noter que cette approche prend en compte les champs magnétiques produits par toutes les sources potentielles sans les distinguer. La durée des mesures est généralement de 24 ou 48 heures. Cependant, ce type de mesures ne donne pas d'indications sur l'historique de l'exposition des individus aux champs électromagnétiques, qu'il est important de prendre en compte dans l'évaluation et la prévention des risques sanitaires liés aux champs électromagnétiques.

Les questions de durée des mesures (et donc de précision), d'influence de la saison ou du cycle hebdomadaire, de reproductibilité dans le temps et de connaissance de l'historique de l'exposition

¹⁵ La moyenne géométrique est plus adaptée que la moyenne arithmétique pour rendre compte d'une exposition à des événements dispersés dans le temps.

doivent être abordées au moment de l'élaboration du protocole de mesure. La grande variabilité de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques dans le temps met l'accent sur l'importance de mesures individuelles prolongées pour une estimation rigoureuse de l'exposition de la population.

3.2.3 Méthodes normalisées de mesure des champs électromagnétiques

Les normes NF EN 62226-1, -2-1 et -3-1 sur l'exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence fournissent des éléments normalisés pour le calcul des densités de courants induits et des champs électriques induits dans le corps humain.

Par ailleurs, il existe également une norme élaborée dans le cadre de la directive n° 73/23/CEE du 01/02/1973 (dite « Directive basse tension ») concernant le rapprochement des législations des états membres relatives au matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension. La norme NF EN 50366/A1 fournit les méthodes d'évaluation et de mesure des appareils électrodomestiques et analogues dans le domaine des champs électromagnétiques.

Des appareils de mesure des champs magnétique et électrique extrêmement basses fréquences sont présentés au paragraphe 3.4.4.

3.3 Analyses des données disponibles sur l'évaluation de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Les sources de champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences auxquelles les personnes peuvent être exposées sont généralement identifiées selon leur usage collectif ou privé. Pour les équipements à usage collectif, on peut citer les lignes de transport et de distribution d'électricité, les transformateurs, l'alimentation des trains, métros ou tramways et leur fonctionnement, l'alimentation des immeubles collectifs et l'éclairage public. Dans la sphère privée, il s'agit du câblage électrique et de l'éclairage à l'intérieur des habitations et plus généralement de tous les appareils domestiques et électroménagers.

Plusieurs études ont été conduites dans différents pays pour déterminer l'exposition des populations aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Cependant, toutes ces études ont été réalisées dans des contextes différents liés à chacun des pays. De plus, les méthodologies et modes opératoires diffèrent selon l'objectif poursuivi dans chaque étude (cadre d'une étude épidémiologique ou d'une évaluation de l'exposition). Celles-ci ne sont donc pas facilement comparables. Par ailleurs, dans la plupart des études épidémiologiques, l'exposition n'a pas fait l'objet d'une mesure individuelle directe.

Les données d'exposition citées ci-après sont issues de quelques études réalisées en Europe, notamment en France, et dans le monde.

3.3.1 Exposition de la population générale

3.3.1.1 Exposition de la population aux champs électromagnétiques liés aux lignes de transport et de distribution d'électricité

Le réseau de transport (haute tension) et de distribution (moyenne tension) de l'électricité génère dans le voisinage immédiat des installations (lignes, câbles, postes de transformation) des champs électriques et magnétiques à la fréquence de 50 Hz en France¹⁶. Le champ électrique créé par les

¹⁶ Aux États-Unis, la fréquence du courant alternatif et donc des champs magnétiques produits est de 60 Hz.

lignes à haute tension est d'autant plus élevé que la tension est importante. Pour une ligne très haute tension de 400 kV, le champ électrique produit est de 5 kV/m au niveau du sol et décroît rapidement avec la distance par rapport à la ligne, de sorte qu'à 30 m celui-ci est de l'ordre de 2 kV/m et devient très faible (quelques volts par mètre) à partir de 100 m (voir Tableau 2). Pour le champ magnétique, celui-ci est proportionnel au courant transporté dans les lignes et subit d'importantes variations quotidiennes et saisonnières. En général, le courant transporté par les lignes croît avec la tension. Comme pour le champ électrique, le champ magnétique décroît avec la distance. Pour une ligne haute tension B (HTB¹⁷), les valeurs typiques enregistrées varient approximativement de 30 µT au niveau de la ligne, 12 µT à 30 m et tombent à 1 µT à 100 m. Les valeurs typiques mesurées au niveau des lignes moyenne tension et basse tension sont évidemment inférieures. C'est également le cas pour le champ créé par les lignes enterrées qui, même s'il est souvent plus intense au niveau de la ligne, en raison de la distance plus proche avec le point de mesure et du rassemblement des conducteurs, décroît en revanche plus rapidement avec la distance. Enfin, suivant la configuration des lignes de transport de l'électricité, on peut avoir des champs magnétiques sensiblement différents pour un même courant [Maddock, 1992].

Tableau 2 : Exemples de champs électriques et magnétiques calculés à 50 Hz pour des lignes électriques aériennes [RTE et EDF, 2006]

	Champ électrique (en V/m)	Champ magnétique (en µT)
Ligne à 400 kV		
<i>sous la ligne</i>	5 000	30
<i>à 30 mètres de l'axe</i>	2 000	12
<i>à 100 mètres de l'axe</i>	200	1,2
Ligne à 225 kV		
<i>sous la ligne</i>	3 000	20
<i>à 30 mètres de l'axe</i>	400	3
<i>à 100 mètres de l'axe</i>	40	0,3
Ligne à 90 kV		
<i>sous la ligne</i>	1 000	10
<i>à 30 mètres de l'axe</i>	100	1
<i>à 100 mètres de l'axe</i>	10	0,1
Ligne à 20 kV		
<i>sous la ligne</i>	250	6
<i>à 30 mètres de l'axe</i>	10	0,2
<i>à 100 mètres de l'axe</i>	négligeable	négligeable

¹⁷ La classe « haute tension » comporte 2 sous-classes : la haute tension A, entre 1 000 et 50 000 V en courant alternatif, et la haute tension B, au-dessus de 50 000 V.

	Champ électrique (en V/m)	Champ magnétique (en μT)
Ligne à 230 V		
<i>sous la ligne</i>	9	0,4
<i>à 30 mètres de l'axe</i>	0,3	négligeable
<i>à 100 mètres de l'axe</i>	négligeable	négligeable

Tableau 3 : Exemples de champs magnétiques calculés à 50 Hz pour des lignes électriques souterraines [RTE et EDF, 2006]

	Champ magnétique (en μT)	
	Disposition des câbles en nappe	Disposition des câbles en tréfle
Ligne à 225 kV		
<i>à l'aplomb</i>	20	6
<i>à 5 mètres de l'axe</i>	4	1
<i>à 20 mètres de l'axe</i>	0,3	0,1
Ligne à 63 kV		
<i>à l'aplomb</i>	15	3
<i>à 5 mètres de l'axe</i>	3	0,4
<i>à 20 mètres de l'axe</i>	0,2	négligeable

Les Tableau 2 et Tableau 3 ci-dessus récapitule les intensités des champs électriques et magnétiques calculées par RTE pour différentes lignes de transport. Ces valeurs sont dites « enveloppes », elles correspondent à des valeurs maximales réalistes issues de l'ensemble des calculs de RTE.

Au niveau des transformateurs qui servent à élever (transport) ou à diminuer (distribution) la tension, le champ magnétique aux alentours peut varier de 20 à 30 μT . Ces valeurs relativement faibles sont liées au fait que le transformateur est conçu pour concentrer le champ magnétique en son centre ce qui permet de minimiser les fuites du flux magnétique. Les valeurs les plus élevées sont mesurées à proximité des câbles de sortie basse tension et du tableau de distribution. Le champ électrique dans les postes de transformation reste faible, de l'ordre de quelques dizaines de volts par mètre.

L'étude française conduite en Côte d'Or par EDF [Clinard *et al.*, 2004] avait pour objectif d'estimer l'exposition de la population dans les habitations situées à proximité de lignes de transport du courant électrique. Cette étude a porté sur 237 résidences réparties de la manière suivante : 60 situées à moins de 300 m de lignes 400 kV, 62 situées à moins de 200 m de lignes 225 kV et 130 situées à moins de 100 m de lignes 63 kV. Pour les 60 résidences individuelles situées à proximité des lignes 400 kV, 5 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 μT (8,4 %) et 1 supérieur à 0,4 μT (1,7 %). Pour les 62 résidences individuelles situées à proximité des lignes 225 kV, 16 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 μT (25,8 %) et 6 supérieur à 0,4 μT (9,7 %). Enfin, pour les 130 résidences (68 individuelles et 62 collectives) situées à proximité des lignes 63 kV, 18 ont un niveau moyen supérieur à 0,2 μT (13,9 %) et 7 supérieur à 0,4 μT (5,4 %). Ces données permettent à RTE d'estimer la population française exposée à plus de 0,4 μT du fait des lignes à

haute tension à environ 375 000 personnes (0,6 %). Il faut toutefois souligner que les conclusions de cette étude sont limitées par sa petite taille et difficilement généralisables du fait de l'absence de représentativité des résidences incluses.

Une étude en cours commanditée par la Direction générale de la santé, intitulée *Experts*, a pour objectif de mieux évaluer l'exposition de la population. Le paragraphe 3.4.2 présente une analyse méthodologique et les premiers résultats de cette étude actuellement en cours.

En Belgique, une étude a été conduite sur l'estimation du nombre d'enfants exposés à des champs d'intensité moyenne supérieure à 0,4 μT dus aux lignes de transport du courant. Ce travail a été réalisé à partir d'une modélisation mathématique des champs générés par ces lignes [Decat *et al.*, 2003]. Pour une charge maximale des lignes, cette estimation trouve une proportion d'enfants exposés de 0,5 % du fait de la proximité de lignes 70 kV, 0,63 % pour des lignes 150 kV et 0,26 % pour 380 kV.

Au regard de ces données, l'exposition du public due aux lignes haute tension reste relativement faible et concerne une petite fraction de la population.

3.3.1.2 Exposition de la population aux champs électromagnétiques liés à l'alimentation des trains, métros ou tramways

La population, clients ou riverains des lignes, peut être exposée à des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences provenant du réseau ferroviaire. En réponse à une demande de l'Afsset, la SNCF (Société nationale des chemins de fer de France) a fourni à l'Agence un document écrit où sont renseignées les données en leur possession concernant l'exposition de la population générale et des agents SNCF aux champs extrêmement basses fréquences issus des installations ferroviaires. La caractérisation des champs électriques et magnétiques peut être réalisée par la SNCF, soit par calcul théorique, soit par mesures. Pour ce faire, l'entreprise dispose de services dédiés à la Direction de l'Ingénierie.

o Les TGV (Trains Grandes Vitesses)

Les clients des lignes peuvent être exposés à bord du train ainsi qu'au niveau des quais de gare. Des mesures de champs électromagnétiques ont été réalisées à bord des trains pour évaluer l'exposition des clients et des travailleurs, sous l'impulsion d'un groupe de travail associant un médecin du travail, des ingénieurs matériel / traction et électrique / télécommunications et des techniciens mesureurs.

Les premières mesures ont ainsi été réalisées en 1990 à bord du TGV Atlantique, puis à bord du TGV Duplex en 1994 ; les ordres de grandeur pour le champ magnétique en remorque sont les suivants 7 μT (TGV A) et 2,5 μT (TGV Duplex).

Une délégation américaine (Office de recherche et de développement de Washington) avait fait pratiquer ses propres mesures sur le TGV A en 1993 sur la ligne Paris-Tours et observé des résultats comparables (valeur moyenne du champ magnétique 3,1 μT en remorque, 0,7 μT aux abords de la voie et 0,59 μT sur le quai de gare).

Pour ce qui est du TGV Duplex, les mesures ont été réalisées à l'étage de la rame, la caisse en aluminium apportant une meilleure atténuation du champ que la caisse en acier du TGV A.

o Les quais de gares

Depuis 15 ans, la SNCF a fait réaliser différentes séries de mesures sur les quais de gare et dans le périmètre des bâtiments voyageurs, pour répondre à la demande d'agents, de clients ou de riverains, par exemple à Lille Europe, Paris Saint-Lazare, Aulnay, Saint-Cloud, Epinay-sur-Orge.

Les résultats de mesures de champ étaient inférieurs aux valeurs limites préconisées pour le public par la recommandation européenne déjà citée. Les procès-verbaux de ces mesures sont détenus par l'IG-LE (Laboratoire d'essais électriques de la SNCF).

3.3.1.3 Exposition de la population aux champs électromagnétiques à l'intérieur des habitations

À l'intérieur des habitations, les sources de champ sont de deux types : les réseaux électriques et les appareils électroménagers.

Le réseau terminal de distribution dans les rues et les immeubles, les réseaux en façade d'immeubles et l'alimentation de l'éclairage public, en raison des intensités véhiculées, produisent les niveaux de champ magnétique les plus élevés rencontrés dans les habitations.

Compte tenu de la configuration des conducteurs du réseau domestique, les champs magnétiques sont peu élevés, de l'ordre de $0,2 \mu\text{T}$ ¹⁸.

L'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences dus aux appareils électroménagers dépend de la distance à ces équipements. Pour la plupart, le champ électrique créé et mesuré à une distance de 30 cm reste en général inférieur à 150 V/m.

Dans le Tableau 4 sont présentés quelques exemples (colonne du milieu) de champs magnétiques produits par des appareils domestiques et mesurés généralement à 30 cm ([Gauger, 1984] ; [Bernhardt, 1986] ; [Rollier, 1988] ; [Schiffman *et al.*, 1998] ; [Khourchafi *et al.*, 2009]). De plus, des valeurs issues de mesures réalisées par le RIVM (National Institute for Public Health and Environment, organisme hollandais) sont également présentées (colonne de droite). Ces valeurs sont issues d'un rapport de 2009 [RIVM, 2009] portant sur les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Après un recensement des données disponibles dans la littérature, le RIVM a procédé à des mesures de champs dans des conditions d'exposition courantes.

Ces mesures ont été faites à la demande des services municipaux de santé publique hollandais afin de leur fournir des informations de base pour répondre aux questions des citoyens. Les protocoles de mesure ont également été élaborés pour aider ces services dans l'exécution de mesures futures. Par conséquent, et selon le RIVM, les mesures présentées dans ce rapport ne peuvent pas être considérées comme représentatives de situations apparemment similaires. En effet, plusieurs facteurs tels que le type et l'âge de l'appareil ménager influent sur la force du champ.

Le RIVM mentionne que les données disponibles sur les émissions d'appareils électroménagers dans la littérature sont rares, ce qui ne permet pas d'établir de comparaison pour certaines de leurs mesures.

Tableau 4 : Induction électromagnétique de différents appareils électroménagers

Équipements	Induction magnétique (μT)	Mesures par le RIVM de l'induction magnétique (μT)
Grille-pain	0,06 à 0,7	/
Lave-vaisselle	0,6 à 3	0,26 (10 cm) 0,41 (5 cm)
Percolateur	0,08 à 0,15	/

¹⁸ <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/index3.html>

Équipements	Induction magnétique (μT)	Mesures par le RIVM de l'induction magnétique (μT)
Plaque de cuisson	0,1 à 0,35	/
Réfrigérateur	0,01 à 0,25	< 0,4
Chaîne stéréo	0,19	/
Télévision (écrans cathodiques)	0,04 à 0,2	0,25 à 1
Fer à repasser	0,12 à 0,3	/
Foreuse	2 à 3,5	/
Machine à laver	0,15 à 3	/
Scie	1 à 25	/
Séchoir	0,08 à 0,3	/
Rasoir (3 cm)	15 à 1500	/
Sèche-cheveux (3 cm)	6 à 2000	2 à 20
Couverture chauffante (3 cm)	0,3 à 5	/
Lampe de chevet	2	/
Réveil électrique	0,5 à 1	0,1 à 0,4
Ampoule à incandescence	2	/
Aspirateur (au niveau du sol)	2 à 20	2 à 3
Chauffage électrique par le sol	8 à 12	/
Compteur d'énergie domestique	0,6 à 3,5	/
Lampe halogène	0,17	/
Radiateur électrique	0,15 à 5	/
Tableau domestique	4 à 5	/
Ventilateur	0,03 à 4	/

Les deux plus importantes études sur l'exposition de la population aux champs électromagnétiques menées en Europe ont été réalisées en Allemagne [Schüz *et al.*, 2001] et au Royaume-Uni [UKCCS, 1999] ; elles ont permis d'évaluer l'exposition résidentielle des personnes. Ces deux études donnent une estimation des populations concernées exposées, dans leur habitation, à des champs dépassant une moyenne ou une médiane de 0,2 ou 0,4 μT. Cette exposition a été évaluée avec des mesures effectuées dans 6 670 résidences au Royaume-Uni et 1 835 résidences en Allemagne, résidences choisies dans les deux cas d'une façon aléatoire vis-à-vis de la proximité des lignes haute tension. Ainsi, 3,7 % des habitations étaient situées à moins de 400 m d'une ligne au Royaume-Uni et 1,3 % des habitations en Allemagne étaient situées à moins de 50 m (la notion de proximité des ouvrages électriques n'étant donc pas identique dans

ces deux pays). Notons par ailleurs que l'étude allemande a été conduite dans le lieu de résidence d'enfants atteints de leucémie et de témoins.

Sur l'ensemble des habitations examinées au Royaume-Uni, 2,3 % présentaient une exposition moyenne qui dépassait 0,2 μT et 0,4 % étaient au-dessus de 0,4 μT . Dans ce dernier cas, seules 20 % des habitations étaient situées à proximité de lignes électriques.

En Allemagne, les mesures ont été effectuées sur 24 h, dans la chambre des enfants et la salle de séjour et une mesure moyenne a été réalisée en déambulant très lentement dans l'habitation. La médiane de l'exposition était inférieure à 0,1 μT pour 93,1 % des 1 314 témoins de l'étude. Des médianes supérieures à 0,2 μT sont mesurées chez 1,4 % des témoins et des médianes supérieures à 0,4 μT sont mesurées chez 0,2 % des témoins. Pour les habitats où la médiane dépasse 0,2 μT , la proximité de lignes est retrouvée dans 28 % des cas. Dans les autres cas, il s'agit du voisinage de câbles souterrains (14 %), du réseau de distribution et de l'éclairage public (32 %) et dans 25 % des cas, la cause n'a pas pu être retrouvée. Enfin, une des conclusions de cette enquête indique que les valeurs de champ mesurées sont plus élevées dans les appartements que dans les résidences individuelles.

Une étude taiwanaise [Chung-Yi *et al.*, 2007] a eu pour objectif l'évaluation de l'exposition résidentielle aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences d'enfants à Taïwan. Les auteurs de l'étude ont estimé l'exposition dans les familles avec des enfants dont l'âge était inférieur à 7 ans. Pour choisir un échantillon représentatif, un total de 40 zones a été choisi et toutes les familles avec des enfants âgés de moins de 7 ans (4 184) ont été visitées et sollicitées pour des mesures dans leurs maisons. Ces dernières ont été effectuées dans les chambres de chaque famille choisie sur une période de deux ans. Un questionnaire sur les caractéristiques résidentielles et les équipements de puissance a été également utilisé. Des mesures de champ ont été effectuées dans 2 214 familles (taux de participation 53 %). La moyenne pondérée de l'exposition globale a été estimée à 0,121 μT (écart-type 0,185 ; gamme 0,010 - 3,304 μT). Les expositions moyennes étaient supérieures à 0,3 et 0,4 μT dans environ 7,3 % ($n = 159$) et 5,4 % ($n = 115$) des ménages, respectivement. Il y avait une corrélation entre l'exposition moyenne résidentielle et l'exposition mesurée dans les chambres à coucher des enfants. Les vieux bâtiments, les bâtiments à usage résidentiel et commercial, ainsi que les bâtiments près des équipements de puissance avaient une exposition moyenne au-dessus de 0,4 μT .

3.3.2 Exposition des travailleurs

3.3.2.1 Exposition des employés de bureau

Le Tableau 5 présente quelques valeurs de champs magnétiques produits par des équipements en milieu professionnel et mesurés à une distance correspondant à une utilisation courante ([Gauger, 1984] ; [Rollier, 1988] ; [Bernhardt, 1986] ; [Schiffman *et al.*, 1998] ; [Khouchafi *et al.*, 2009]). Ces valeurs sont évidemment indicatives, et *a priori* fortement dépendantes des modèles d'appareils considérés. L'exposition des personnes dépend ensuite totalement des conditions d'usage de ces machines, et notamment de la distance à laquelle se trouvent les opérateurs par rapport à ces appareils.

Tableau 5 : Valeurs de champs magnétiques produits par des équipements en milieu professionnel et mesurés à une distance correspondant à une utilisation courante

Équipement	Induction magnétique (μT)
Photocopieur (50 Hz)	1 à 1,2
Fax (50 Hz)	0,4
Ecran d'ordinateur (50 Hz)	0,7
Procédés électrolytiques (0 – 50 Hz)	1 000 à 7 000
Machines à souder (0 - 50 Hz)	130 000
Four à induction (0 – 10 kHz)	1 000 à 6 000

3.3.2.2 Exposition des personnels de salon de coiffure

Une étude canadienne [Frenette et Barre, 2007] a eu pour objectif l'évaluation de l'exposition potentielle de coiffeuses aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences provenant de séchoirs à cheveux. En effet, les coiffeuses utilisent des séchoirs à cheveux portatifs sur des périodes prolongées. Cette étude a évalué l'exposition potentielle de 64 coiffeuses travaillant dans 33 salons de la région de Montréal aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. L'intensité du champ magnétique mesuré au contact du boîtier du séchoir variait entre 4 et 490 μT (moyenne de 181 μT). La fréquence moyenne des contacts entre le séchoir à cheveux et l'abdomen s'élevait à 1,2 contacts par minute par cliente pour l'ensemble des coiffeuses et à 2,7 pour les coiffeuses enceintes (n = 6). La durée moyenne d'utilisation des séchoirs s'élevait à 4,1 heures par quart de travail lors des journées les plus occupées. Plusieurs coiffeuses sont potentiellement exposées à des intensités de champs magnétiques supérieures aux recommandations de l'Icnirp basées sur des effets aigus. Les auteurs de cette étude recommandent que les fabricants réduisent l'intensité du champ magnétique émis par les séchoirs à cheveux.

3.3.2.3 Exposition des travailleurs des chemins de fer

L'exposition aux champs électromagnétiques peut concerner les agents des réseaux ferroviaires à plusieurs niveaux, notamment dans les cabines de conduite ou aux postes d'aiguillage.

■ Données fournies par la SCNF

Comme il est précisé dans la section 3.3.1.2, la SNCF a fourni à l'Afsset un document écrit récapitulant ses données concernant l'exposition de ses agents aux champs extrêmement basses fréquences.

Dans le cas des cabines de conduite, le champ magnétique est proportionnel à la puissance du train ou au courant capté à la caténaire. Il a été mesuré à 12,5 μT en cabine de conduite de TGV. Dans le cas de deux rames TGV accolées roulant à 300 km/h, le champ est plus important et est de 37,5 μT. Les champs mesurés dans les cabines de conduite d'autres types de motrice sont compris entre 1,25 et 6,25 μT.

Les résultats des mesures sur des postes d'aiguillage ont montré que le champ était de l'ordre de quelques microteslas et donc très inférieurs à la limite recommandée par la Commission européenne.

Les agents des sous-stations – qui permettent de transformer le courant arrivant des câbles à haute tension en courant continu à 1 500 V ou en courant alternatif 50 Hz à 25 kV – sont aussi

exposés à des champs magnétiques extrêmement basses fréquences (50 Hz). Les valeurs maximales mesurées dans deux sous-stations à 25 kV sont inférieures aux valeurs de référence préconisées par la recommandation européenne pour le public et les travailleurs.

■ Autres données

La relation entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et la mortalité par leucémie et tumeur cérébrale a été étudiée chez les travailleurs des chemins de fer suisses [Röösli *et al.*, 2007]. Les données ont été recueillies auprès d'une cohorte de 20 141 employés suivis entre 1972 et 2002.

Pour les conducteurs de train, qui sont les plus exposés aux champs extrêmement basses fréquences, l'exposition annuelle moyenne était d'environ 21 μ T. Pour les ingénieurs en gare de triage, elle était comprise entre 3,6 μ T en 1940 et 6 μ T en 2000. Pour les chefs de gare, elle était autour de 1 μ T. Enfin, pour les passagers, elle était inférieure à 2 μ T jusqu'en 1980, mais est passé à environ 4 μ T avec le passage à de nouvelles voitures.

Les trains suisses fonctionnent avec un courant alternatif de 16,7 Hz, ces données ne sont donc pas directement comparables aux données françaises.

3.3.2.4 Exposition des travailleurs exerçant dans des transformateurs électriques

Une étude [Borjanovic *et al.*, 2005] a été menée en Serbie pour évaluer les modifications des électrocardiogrammes chez les hommes exposés à des champs magnétiques 50 Hz. Dans cette étude, 59 travailleurs exerçant dans des transformateurs électriques ont été divisés en trois groupes exposés à des champs magnétiques d'intensités différentes. Trois niveaux d'exposition ont été considérés : faible (0,067 μ T), moyen (1,18 μ T) et fort (5,2 μ T). L'étude s'est déroulée en trois étapes. La première a consisté à mesurer l'intensité du champ magnétique produit par les postes de transformation. Puis ces données sur les champs magnétiques ont été utilisées avec d'autres données d'exposition pour estimer la valeur moyenne d'exposition calculée sur 12 heures (TWA) des personnes travaillant dans les postes de transformation de courant. Enfin, la dernière étape avait pour but de déterminer si les niveaux d'exposition présentaient un effet dose-réponse pouvant influencer sur les intervalles et les ondes des électrocardiogrammes (ECG) pratiqués.

Les résultats de l'étude montrent que la relation entre l'intensité du champ et la réponse des ECG n'est pas linéaire. Les auteurs avancent comme explication à cette relation complexe l'existence possible de schémas d'exposition que l'utilisation de la moyenne pondérée dans le temps ne permettrait pas de mettre en évidence.

Ce qu'il faut souligner, c'est que l'exposition liée aux transformateurs eux-mêmes reste effectivement faible pour des raisons de construction déjà citées (section 3.3.1.1). Néanmoins les stations de transformation constituent de fait des points où l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences sera plus élevée que celle engendrée par les lignes haute tension quelles soient aériennes ou enterrées. En effet, pour réaliser l'élévation ou la réduction de la tension, les câbles d'alimentation du courant sont systématiquement ramenés au niveau du sol, ce qui par un simple effet de proximité va engendrer autour de ces stations des valeurs de champs plus élevées que celles mesurées en considérant ces mêmes câbles dans une position plus éloignée.

3.4 Analyse des études d'exposition récentes ou en cours

3.4.1 Étude d'exposition à Champlan

L'Afsset a réalisé en 2007 et 2008 une étude de caractérisation de l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la commune de Champlan (Essonne) [Merckel *et al.*, 2009]. Cette étude a été coordonnée par l'Ademe (Agence de l'environnement et de la

maîtrise de l'énergie) et réalisée pour le compte du programme d'études environnementales à Champlan.

3.4.1.1 Objectif et méthodologie

L'objectif principal de l'étude de Champlan consistait à évaluer l'exposition individuelle, pendant une période donnée, de quelques Champlanais aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences issus de sources domestiques et des lignes de transport d'électricité. En particulier, l'étude devait permettre de distinguer les expositions liées aux appareils électroménagers domestiques de celles dues aux moyens de transports ou aux lignes de transport d'énergie électrique à haute tension présentes sur le territoire de la commune.

L'Afsset a passé une convention de recherche avec l'École supérieure d'électricité (Supélec) afin de créer un laboratoire de référence pour la mesure des champs magnétiques extrêmement basses fréquences (caractérisation d'appareils de mesure, étalonnage, etc.) et caractériser l'exposition d'un échantillon de la population de Champlan. Pour évaluer l'exposition, trois outils méthodologiques ont ainsi été mis en place :

- une évaluation de l'exposition personnelle pendant 24 h de volontaires champlanais ;
- la mesure en 2 points fixes pendant 24 h du champ magnétique chez deux des volontaires les plus exposés ;
- une cartographie du champ magnétique basses fréquences sur les voies publiques de la commune.

Supélec a sélectionné des appareils de mesure du champ magnétique extrêmement basses fréquences fiables et reconnus (Emdex II). Le laboratoire mis en place a permis d'étalonner les appareils disponibles et d'en contrôler le fonctionnement pendant la campagne de mesure. Ces phases d'étalonnage et de vérifications antérieures et postérieures aux mesures ont permis d'obtenir des données fiables et rigoureuses. Dix-huit personnes sélectionnées parmi une trentaine de volontaires habitant ou travaillant à Champlan ont été sollicitées pour porter ces appareils pendant 24 heures. L'objectif était d'obtenir des situations d'exposition aux champs magnétiques *a priori* diverses et non de sélectionner un échantillon représentatif de la population de Champlan. Ainsi, 7 personnes ont été sélectionnées pour la proximité (jusqu'à environ 100 m) de leur lieu de résidence avec les lignes de transport d'électricité qui surplombent la limite ouest de la commune. Neuf personnes ont été recrutées habitant à l'écart de ces lignes, et réparties de manière aléatoire dans la commune. Enfin, 2 personnes travaillant à Champlan mais résidant en-dehors de la ville ont été incluses dans l'étude. Les volontaires ont porté l'appareil de mesure pendant 24 h, après avoir reçu des instructions de précaution d'emploi, permettant ainsi d'enregistrer le niveau de champ magnétique extrêmement basses fréquences ambiant (composantes fondamentale 50 Hz et harmoniques¹⁹ jusqu'à 800 Hz). Les personnes ont porté l'appareil dans un sac à dos fourni, ou en bandoulière, dans une pochette également fournie. Compte-tenu des caractéristiques des champs, ces différences de portage n'influent pas sur la mesure. L'enregistrement des données toutes les 3 secondes a permis d'effectuer un échantillonnage temporel précis et de mettre ainsi en évidence des variations rapides de champ magnétique. La restitution de l'appareil, et la vérification de l'enregistrement sur place, avec le volontaire, a permis de compléter efficacement les données renseignées dans un budget espace-temps, dans lequel le volontaire consignait toutes ses activités. Il a ainsi été possible d'identifier des sources de champ magnétique, comme par exemple l'utilisation d'appareils de bricolage électriques, ou le passage dans les portiques de détection antivol en sortie des caisses de supermarché.

¹⁹ Il s'agit d'une fréquence multiple de la fréquence fondamentale. Par exemple, si on appelle « f_0 » la fréquence fondamentale, les harmoniques auront des fréquences égales à : $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, $5f_0$.

Parallèlement, des appareils de mesure ont été laissés en poste fixe dans deux habitations parmi les plus exposées au champ magnétique, afin de détecter des différences d'expositions liées aux variations journalières des transits de courant dans les lignes à très haute tension.

Enfin, une cartographie « instantanée » (dans un intervalle d'une heure) du champ magnétique extrêmement basses fréquences perçu à l'extérieur, sur le réseau routier, a été réalisée afin notamment de mettre en évidence l'influence des lignes de transport d'énergie électrique extérieure (aériennes ou enterrées). Pour cela, un enregistrement synchronisé des données issues de l'appareil de mesure de champ avec les données provenant d'un récepteur GPS a été effectué, permettant l'affichage sur un fond cartographique des données de champs magnétiques mesurées.

3.4.1.2 Résultats

Les mesures d'exposition individuelle mettent en évidence une importante variabilité de l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences : à la fois au cours de la journée, dépendant des activités des volontaires, en fonction des sources de champ, et de l'emplacement géographique des habitations (Tableau 6). Les personnes habitant à l'écart des lignes à très haute tension sont exposées à des niveaux moyens de champ magnétique (moyennes géométriques) de l'ordre de quelques centièmes de microteslas (μT) (Figure 5). Les personnes habitant au voisinage des lignes à très haute tension (quelques dizaines de mètres) peuvent être exposées en moyenne et en fonction des habitudes de vie, à des champs compris entre 0,5 et 3 μT . Des niveaux très ponctuels bien supérieurs ont été enregistrés, principalement dus au passage dans des portiques antivol de grande surface, à l'utilisation d'un four micro-ondes ou d'appareils électriques pour le bricolage.

Tableau 6 : Données issues des enregistrements d'exposition individuelle pendant 24h

Enquête	Moyenne géom. 24h - B (μT)	Champ Maximum (μT)	Commentaires
1	0,67	6,65	Le maximum est dû à l'utilisation d'un four à micro-ondes
2	0,08	6,79	Le maximum est dû à l'utilisation d'un four à micro-ondes et d'une bouilloire électrique
3	0,70	11,97	Le maximum est dû à un portique antivol en sortie d'une grande surface
4	2,00	4,17	Le maximum est dû à la proximité d'une ligne THT au niveau du jardin de la personne
5	0,14	2,61	Le maximum est induit par le passage sous les lignes THT
6	0,01	5,49	/
7	0,06	19,5	Passage à proximité d'un appareil électrique
8	0,02	1,81	/
9	0,08	3,43	/
10	0,02	5,05	/
11	0,05	1,67	/
12	0,07	29,4	Problème avec le four à micro-ondes

13	0,21	10,57	Plaques électriques
14	0,07	2,65	Travail à proximité de multiples appareils électriques
15	0,21	16,21	/
16	0,03	14,21	/
17	0,06	2,21	/

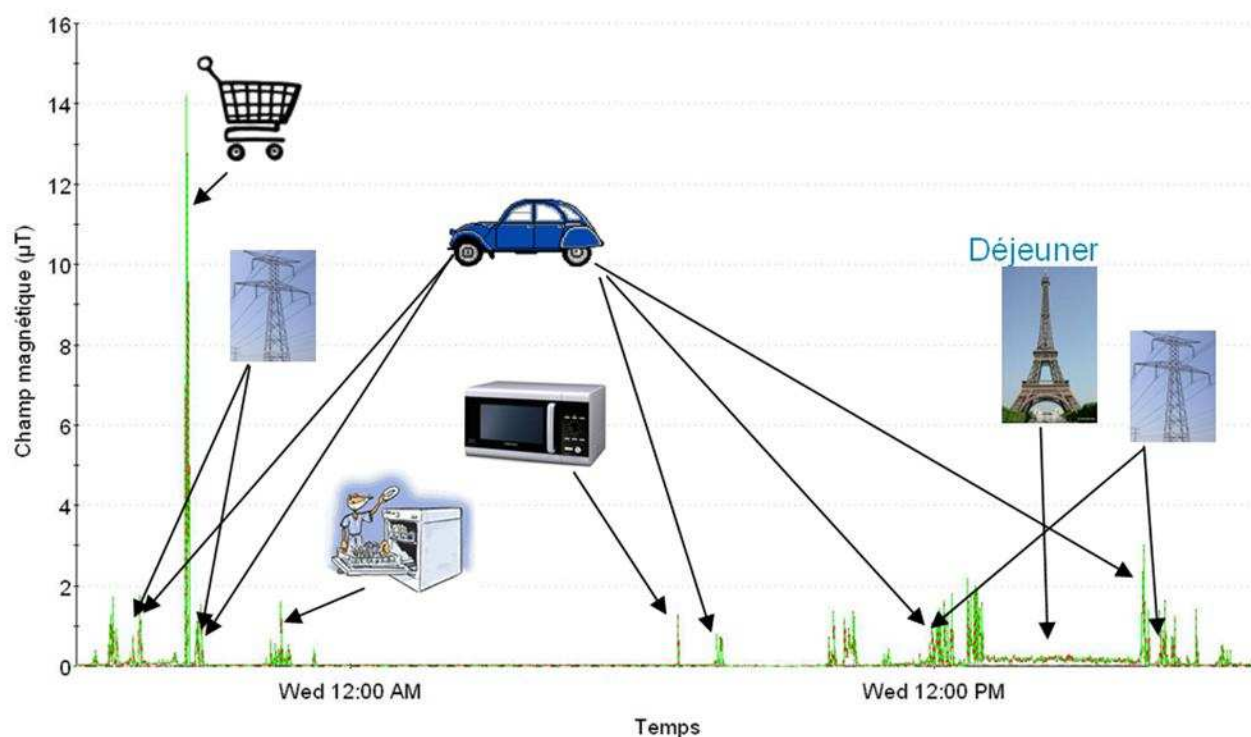


Figure 5 : Enregistrement pendant 24 h du champ magnétique basses fréquences dans l'environnement d'une personne et identification des sources

Les enregistrements en poste fixe (Figure 6) montrent très précisément les variations de champ magnétique liées aux variations du courant transitant dans les lignes et dépendant de la charge du réseau de transport électrique. La capacité des appareils de mesure à discriminer la fréquence fondamentale des harmoniques permet d'attribuer précisément les niveaux de champ magnétique enregistrés au réseau de transport et de distribution électrique (fondamentale) ou aux appareils électroménagers (présence d'harmoniques). Cet outil montre la possibilité de simuler finement les niveaux de champ en milieu résidentiel dus à la présence de lignes de transport d'électricité.



Figure 6 : Enregistrement pendant 24h du champ magnétique basses fréquences en poste fixe dans une habitation située proche de lignes de transport d'électricité

La cartographie réalisée a montré l'impact limité en distance du réseau de transport et de distribution électrique, sur l'emprise des voies de circulation. Cela confirme que l'influence du champ magnétique émis par les lignes à très haute tension se limite à environ une centaine de mètres de part et d'autre des lignes. Le passage à proximité de transformateurs électriques situés en bordure de la voie publique n'a pas permis de détecter de champ magnétique élevé.

3.4.1.3 Conclusions

Bien que limitée en nombre de participants, cette étude de caractérisation de l'exposition humaine aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences montre qu'il est techniquement réalisable d'identifier les principales sources de champ magnétique et de quantifier leur impact dans le cadre d'activités quotidiennes. Elle ouvre la voie à une meilleure prise en compte de l'exposition dans le cadre des études épidémiologiques qui recherchent les effets sanitaires des champs magnétiques extrêmement basses fréquences. Elle souligne également l'intérêt d'études de caractérisation de l'exposition de populations plus importantes et aux habitudes de vie différentes pour affiner notamment les modèles d'exposition en fonction des différentes sources. Le très bon accueil des enquêteurs par les volontaires durant l'étude met par ailleurs en évidence l'importance du dialogue mis en place entre les participants de l'étude et les scientifiques.

3.4.2 Étude Expers

3.4.2.1 Éléments de contexte

Suite à l'avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) de 2005, la Direction générale de la santé (DGS) a missionné l'École supérieure d'électricité (Supélec) pour mettre en œuvre, en partenariat avec EDF et RTE, le projet Expers (Exposition des Personnes) qui a pour objectif de réaliser « une estimation et une caractérisation des expositions de la population française aux champs magnétiques de très basse fréquence ».

Le projet doit étudier :

- les niveaux d'exposition ;
- les types de sources d'exposition et leur importance relative ;
- l'influence du type de résidence sur les niveaux d'exposition.

Le travail est réalisé notamment dans le cadre d'une thèse. La DGS a financé à hauteur de 20 k€ le projet Expers, le reste du coût de l'étude a été pris en charge par RTE et EDF. Une évaluation approximative du budget total est de 700 k€ dont 80 k€ dédiés au dispositif expérimental.

Une audition des responsables scientifiques du projet Expers a eu lieu le 9 septembre 2009 dans les locaux de l'Afsset. Le professeur Gilles Fleury (Supélec) et Isabelle Magne (EDF) nous ont présenté le projet et ont accepté de répondre à nos questions.

3.4.2.2 Matériels et méthode

3.4.2.2.1 *Échantillonnage de la population*

Une population représentative de 1 000 enfants âgés de 0 à 14 ans et de 1 000 adultes et adolescents de plus de 15 ans a été sélectionnée de façon aléatoire. Cette phase de sondage et de collecte de données a été confiée à l'institut de sondage « MV2 conseil » sélectionné après un appel d'offre.

La France métropolitaine étant constituée de 22 régions, comprenant chacune 2 à 8 départements, l'échantillonnage a été fait de telle sorte à respecter la proportion des populations de chaque région.

Il y a eu 3 campagnes de collectes de données : de février à avril 2007, d'octobre 2007 à avril 2008 et d'octobre 2008 à janvier 2009.

La constitution des populations s'est faite en plusieurs étapes décrites ci-dessous :

- un échantillon d'adresses représentatives de la population a été créé en utilisant les statistiques de l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) et l'annuaire de France Télécom ;
- pour prendre en compte les téléphones sur liste rouge de France Télécom, chaque numéro présent dans la liste initiale a été incrémenté d'une unité, pour générer une seconde liste. C'est-à-dire qu'un numéro dans la liste initiale s'écrivant 0142513567 s'écrivait 0142513568 dans la seconde liste. Chaque numéro de cette seconde liste a ensuite été testé par des appels automatiques afin de vérifier s'ils existaient vraiment ;
- les faux numéros ont ainsi pu être retirés de la seconde liste, qui comporte finalement les numéros sur liste rouge ;
- pour prendre en compte les populations ne possédant pas de téléphone fixe, une génération automatique de numéro de portable a été faite en prenant en compte les codes d'appel du territoire. Ces numéros ont ensuite été testés par des appels automatiques pour vérifier leur existence. C'est ainsi qu'une troisième liste a été créée ;

- le fichier d'appel final a été obtenu en concaténant les trois fichiers précédemment obtenus.

Un premier contact téléphonique avec l'adulte faisant autorité dans le foyer a été établi afin de recruter des volontaires pour l'étude. Si l'adulte acceptait le principe de l'étude, le recruteur demandait les jours et mois d'anniversaire des différents membres du foyer. La personne dont le mois et le jour d'anniversaire était le plus proche du mois et du jour de l'appel était sélectionnée pour l'appel. À cette étape, seuls l'âge de la personne sélectionnée, son numéro de téléphone ainsi que son adresse postale étaient connus. Si la personne sélectionnée refusait de participer à l'étude ou ne pouvait porter l'appareil de mesure de champ électromagnétique pendant 24 h, le contact était considéré comme définitivement invalide.

Lors de la première campagne, le recrutement des enfants s'est avéré beaucoup plus difficile que celui des adultes. Il a été décidé, pour faciliter l'accord des adultes à faire participer un enfant à l'étude, qu'une personne adulte du même foyer puisse être incluse dans la population des volontaires.

Les mesures de champ électromagnétique étaient effectuées lors de journées d'activité types, c'est-à-dire en dehors des week-ends et vacances scolaires et du mercredi pour les enfants.

Discussion :

La base de numéros de téléphone utilisée pour l'échantillonnage aléatoire n'est pas *a priori* représentative de la population générale. Il est peu probable que les numéros mobiles puissent être utilisés facilement dans un sondage aléatoire simple sur une base de numéros fixes représentative des foyers français. Les données de l'INSEE permettent de constituer un échantillon représentatif de la population française, à condition que la base de sondage ressemble à celle du recensement ou de l'imposition, c'est-à-dire un ménage résidant à un endroit identifié. Il serait intéressant d'obtenir des précisions sur la façon dont les numéros de mobile ont été générés (par exemple pondération par la part de marché de chaque opérateur), et sur la proportion de téléphones mobiles par rapport à l'ensemble.

La représentativité de la base initiale a été déformée par la sélection d'un adulte et d'un enfant au sein du même foyer, rendue indispensable en raison des difficultés de recrutement. Il serait intéressant de connaître la proportion d'adultes inclus de cette façon dans le second échantillon.

Compte tenu de la durée de l'enquête, il serait important de savoir si la base de numéros était la même ou si elle a été renouvelée en cours d'enquête. Les adresses plus anciennes ont plus de chances d'aboutir à des échecs (déménagement par exemple).

Le calcul du taux de participation devrait en fait être calculé de façon séparée pour les adultes et les enfants, pour les mobiles et pour les lignes fixes.

La comparaison de l'échantillon obtenu à la population source, en termes de département et de degré d'urbanisation du lieu d'habitation, type de logement, âge, sexe, catégorie socioprofessionnelle, niveau d'éducation, etc. pourrait être présentée de façon plus précise. L'échantillon n'apparaît pas pleinement représentatif sur l'âge, le sexe, la distribution des départements, bien que la procédure doive assurer un tirage aléatoire. Un autre choix aurait pu être de stratifier l'échantillonnage par quotas sur des caractéristiques comme la proximité à des lignes à haute tension, de façon à s'assurer un nombre de sujets suffisants dans les catégories les plus exposées.

3.4.2.2.2 Mesure des champs électromagnétiques

Chaque volontaire a porté un appareil de mesure de champ électromagnétique de type Emdex (Enertech, États-Unis). Un enregistrement automatique du champ magnétique a été réalisé toutes les 3 secondes pendant 24 h. L'appareil Emdex a permis de mesurer un signal large bande 40 - 800 Hz ainsi que les harmoniques. L'appareil calculait et enregistrait, à partir de ces données,

l'induction magnétique sur les trois axes. Soixante-cinq appareils Emdex ont été utilisés pour cette étude (voir la section 3.4.4.1 et l'annexe 5 pour la description de l'appareil).

3.4.2.2.3 Calibration et procédures de test

Chaque appareil Emdex a été calibré avant et après chaque campagne de mesure dans un laboratoire du département d'électromagnétisme de Supélec. Dans ce laboratoire, le bruit de fond était très faible (entre 0,03 et 0,05 μ T). Un système semi-automatique de calibration dédié a été développé. L'ensemble est constitué de deux bobines de Helmholtz, d'un générateur basses fréquences programmable et d'un ampèremètre calibré (Annexe 5). Il a été ensuite vérifié que les valeurs de champs mesurés par les appareils Emdex correspondaient aux valeurs théoriques fournies par les bobines de Helmholtz.

Un second système de calibrage appelé « Valise de test » a permis aux enquêteurs sur place de vérifier le bon fonctionnement de l'appareil avant et après les 24 h de mesures. Ce système est constitué d'un solénoïde carré de 25 cm de longueur et constitué de 225 spires qui peuvent être alimentées par 4 courants différents, générant ainsi 4 valeurs de champ magnétique différentes. Ainsi, une comparaison entre le champ magnétique créé et le champ mesuré par l'Emdex a pu être faite.

3.4.2.2.4 Collectes des données

Lors des mesures individuelles sur 24 h, chaque volontaire renseignait progressivement un emploi du temps, en notant le début et la fin de chaque nouvelle activité. Pour les volontaires qui ne pouvaient pas écrire, par exemple les enfants, l'emploi du temps était rempli par une autre personne responsable (parents ou *baby-sitters*).

À la fin de la mesure, l'enquêteur remplissait à l'aide du volontaire un questionnaire contenant des informations relatives aux volontaires et à sa résidence. L'enquêteur notait également les coordonnées GPS à l'entrée de la résidence du volontaire, le nom de l'enquêteur, le numéro de l'Emdex et la date de démarrage de la mesure. Avant d'envoyer les données pour analyse, la société MV2 conseil vérifiait leur validité.

Grâce aux coordonnées GPS de la résidence, la présence de ligne haute tension au voisinage a pu être déterminée. Les distances maximales retenues justifiant un intérêt ont été les suivantes : 200 m pour des lignes d'un voltage de 400 kV, 120 m pour une ligne d'un voltage de 225 kV, 100 m pour une ligne d'un voltage de 150 kV, 70 m pour des lignes d'un voltage de 63 ou 90 kV et 20 m pour les lignes souterraines.

Pour réaliser l'étude, MV2 conseil a formé 7 enquêteurs pour passer les appels téléphoniques initiaux et 71 enquêteurs de terrain.

3.4.2.3 Discussion des résultats préliminaires

Les personnes ayant participé à cette étude ont été sélectionnées de manière aléatoire à partir des listes téléphoniques. Cinquante-trois pour cent des appels téléphoniques n'ont pas abouti et seulement 3 % des personnes contactées ont accepté de participer à l'étude. Pour avoir 2 148 volontaires, l'institut de sondages a dû procéder à 95 312 appels. Ceci s'explique par le taux des appels qui n'ont pas abouti (numéro de fax, répondeurs), le fait que 24 % des familles contactées n'avaient pas d'enfant de moins de 15 ans et le fait que le taux de refus pour des raisons spécifiques était de 12 %. La difficulté principale dans le recrutement a été celui des enfants. En effet, il est essentiel d'obtenir l'accord des parents, qui souvent acceptent de participer eux-mêmes à l'étude mais refusent que leur enfant soit l'objet d'une enquête scientifique. Certaines mesures ont été écartées de l'analyse soit parce que certains volontaires ont tenté de « démonter » l'appareil soit parce qu'ils n'étaient pas en possession de l'appareil de mesure pendant toute la durée des 24 h.

L'écart de proportion entre les différentes classes d'âges de la population infantile sondée et de la population infantile française est de 5 à 10 %. Pour les enfants de moins de 6 ans, les parents

acceptaient avec difficulté le fait que leur enfant porte un appareil de mesure ou qu'il soit l'objet d'une recherche scientifique. Certains parents étaient également inquiets que leurs enfants puissent être soumis à des champs émis par l'Emdex – même si celui-ci n'est qu'un mesureur et n'émet donc aucun champ - ou qu'ils puissent casser l'appareil.

Les personnes en charge de personnes âgées dans des maisons de retraites ont refusé qu'elles puissent participer à la campagne de mesures. Certaines personnes âgées refusaient simplement de communiquer avec des personnes qu'elles ne connaissaient pas. Ceci peut expliquer pourquoi la population des personnes plus âgées soit sous-représentée.

L'écart de proportion entre les différentes classes d'âges de la population adulte sondée et de la population adulte française peut créer un biais de recrutement. Ce biais a été induit lors de la seconde campagne de recrutement lorsque le protocole de recrutement des enfants a été changé.

D'une façon générale, les mères acceptaient plus facilement d'accompagner les enfants dans cette campagne de mesures que les pères. Il y a donc une surreprésentation des femmes.

Sur la base des premiers résultats issus de l'étude Experts, les données suivantes sur l'exposition de la population française peuvent être considérées :

À partir de la répartition du champ magnétique moyen mesuré sur la journée pour tous les volontaires, les auteurs ont suivi une démarche statistique dans laquelle il a été considéré le champ moyen (moyenne arithmétique et moyenne géométrique), pour déterminer les niveaux d'exposition moyens pour chacun des deux groupes de volontaires (enfants et adultes). Les résultats obtenus sont les suivants :

- pour le groupe constitué d'enfants (moins de 14 ans), le champ moyen mesuré est de l'ordre de $0,09 \mu\text{T}$ pour la moyenne arithmétique ($0,02 \mu\text{T}$ pour la moyenne géométrique). La proportion d'enfants exposés à une moyenne arithmétique supérieure à $0,4 \mu\text{T}$ a été trouvée de l'ordre de 3,2 %, soit 32 enfants, ce qui est élevé en regard des autres études réalisées dans d'autres pays basées sur des mesures résidentielles (sans magnétomètre portable). Cependant, une analyse plus précise de ces données a montré que, dans 21 cas, il s'agissait d'une exposition du magnétomètre reflétant une source de champ très proche produite par un radio-réveil, dans la majorité des cas. Après correction, le nombre d'enfants exposés à une moyenne arithmétique supérieure à $0,4 \mu\text{T}$ est de l'ordre de 10, soit près de 1 %, ce qui est totalement cohérent avec ce qui est trouvé dans les autres études ;
- pour les adultes, le champ moyen mesuré est de l'ordre de $0,14 \mu\text{T}$ pour la moyenne arithmétique ($0,03 \mu\text{T}$ pour la moyenne géométrique). Seuls 11 adultes sont exposés à un champ moyen supérieur à $1,54 \mu\text{T}$ dont l'origine une fois encore est majoritairement liée au placement des Emdex à proximité des radios-réveils pendant la nuit. Par ailleurs, des tests de rang ont montré de manière claire que d'une part les enfants sont moins exposés que les adultes et d'autre part que le champ moyen dans la journée est plus élevé en Île-de-France que dans les autres régions.

En utilisant des modèles linéaires et des modèles additifs généralisés, les auteurs ont pu déterminer des corrélations entre certains facteurs, qui étaient explicites dans les questionnaires soumis aux personnes sondées, et l'exposition à un certain champ. De cette analyse, l'exposition mesurée peut être expliquée par un certain nombre de facteurs, comme le temps dans les transports ferroviaires, le temps passé devant un ordinateur, le fait d'avoir un radio-réveil à proximité du lit, le type d'habitation (appartement ou pavillon) et le fait de résider dans une commune de plus de 2 000 habitants. Cependant, le taux de variance expliqué pour ces facteurs est à peine de 20 %, ce qui rend le modèle non prédictif, notamment pour donner une valeur d'exposition du champ en fonction du temps passé dans certains types d'activités.

3.4.3 Enquête citoyenne du Criirem « Vivre avec une ligne THT »²⁰.

3.4.3.1 Éléments de contexte

En décembre 2004, un débat public a été instauré sur le projet de construction d'une ligne très haute tension (tracé d'environ 150 km) reliant la Manche et la Bretagne, à partir du réacteur nucléaire de 3^{ème} génération (EPR) de Flamanville. Le rapport correspondant a été publié en décembre 2006²¹ par la Commission particulière du débat public.

Parallèlement, un collectif d'opposants à la construction de l'EPR et à l'implantation de la ligne THT « Cotentin-Maine », s'est constitué.

Le Criirem a été sollicité en décembre 2007 par ce collectif pour étudier les symptômes de la population résidant à proximité des lignes THT et a ainsi mis en place une enquête citoyenne présentée comme une « étude de voisinage » destinée « à recenser les symptômes et maladies dont souffrent les riverains des réseaux électriques ».

Le Criirem a rendu public sur son site internet une synthèse des résultats de cette enquête le 23 janvier 2009. Cette synthèse soulevant beaucoup d'interrogations tant sur le plan du recueil des informations par les enquêteurs que sur le plan des analyses statistiques effectuées, l'Afsset a auditionné les représentants du Criirem, Pierre Le Ruz et Catherine Gouhier, le 7 octobre 2009, dans ses locaux. L'audition a fait l'objet d'un enregistrement, un *verbatim* a ainsi été obtenu.

Lors de cette audition, en plus de la synthèse des résultats fournie sur leur site internet et destinée au grand public, les représentants du Criirem ont fourni à l'Afsset les documents suivants :

- une synthèse des résultats ;
- un « livret de l'enquêteur » remis à tous les enquêteurs intervenus lors de cette étude (Annexe 3.1) ;
- le questionnaire remis dans chaque foyer ou lieu de travail (Annexe 3.2).

3.4.3.2 Méthode

3.4.3.2.1 *Les différents acteurs de cette enquête*

- Le comité de pilotage

Un comité de pilotage a été créé avec pour ambition « de valider les différentes étapes de l'enquête, les publications finales et de garantir l'objectivité de l'enquête ».

Ce comité a été constitué de représentants d'associations (Mayenne survoltée, Manche sous tension, Ille-et-Vilaine sous tension), de représentants du monde agricole (Confédération paysanne, Coordination rurale, Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles), de représentant d'élus locaux et du Criirem.

²⁰ Rapport disponible sur le site du Criirem :

http://www.Criirem.org/index.php?option=com_content&view=article&id=39:enquete-citoyenne-qvivre-sous-une-ligne-thtq&catid=37:news&Itemid=91

²¹ Rapport disponible sur <http://www.debatpublic-epr.org/docs/pdf/bilan-du-debat/rapportgt-bilan-rte-vf.pdf>

- Les coordinateurs et les enquêteurs

Les coordinateurs ont été présentés par le Criirem comme des personnes ayant pour mission de former les enquêteurs. Ces coordinateurs ont été formés eux-mêmes par des membres du Criirem. Un document intitulé « livret de l'enquêteur » a été remis à chaque enquêteur (Annexe 3.1).

- Les personnes en charge de l'analyse des données

L'analyse de données a été confiée à des étudiants en première année master (M1) à l'université du Maine. L'intitulé du master est « Mathématiques pour l'Assurance et pour la Finance ».

- Identification des populations en fonction de leur niveau d'exposition

Les personnes en charge de l'étude ont défini 3 populations : « population exposée », « population moyennement exposée » et « population non exposée » :

- « exposée » pour les personnes résidant à plus ou moins 300 mètres de part et d'autre de la ligne THT Flamanville - Domloup et de la ligne THT Domloup - Les Quintes ;
- « moyennement exposée » pour les personnes résidant jusqu'à 300 mètres de part et d'autre de l'axe de la ligne THT Domloup - Les Quintes ;
- « non exposée » pour les personnes résidant dans le fuseau d'étude retenu par RTE pour l'éventuelle ligne THT Cotentin - Maine.

3.4.3.2.2 Les questionnaires

Deux questionnaires ont été envoyés à chaque foyer, le premier avec pour objectif de recueillir des informations sur le lieu d'habitation ou de travail et le second afin de recueillir des données individuelles.

Le premier questionnaire soumis aux participants est composé de trois parties destinées à collecter des informations concernant :

- le lieu d'habitation ;
- le lieu de travail ;
- l'exploitation agricole (si cela est pertinent).

Un second questionnaire intitulé « questionnaire individuel » a été soumis à chaque membre du foyer. Les deux questionnaires se trouvent en annexe de ce rapport (Annexe 3.2).

3.4.3.3 Résultats

Lors de leur audition, les représentants du Criirem ont déclaré que des mesures de champs magnétiques avaient été effectuées dans environ 10 foyers avec des champmètres étalonnés, dans les pires cas, c'est-à-dire dans les zones où le champ était suspecté être le plus fort (par exemple sur le toit des maisons dans le cas des maisons proches des lignes hautes tensions).

Pour les personnes non exposées aux lignes THT, le champ a été mesuré au centre de la pièce. Les instruments utilisés ont été les suivants :

- *ELT400 Magnetic Field Tester* – Narda ;
- *EFM 130 – Electric Field Measurements*.

Les résultats des mesures déclarés par le Criirem sont les suivants :

- les mesures ont permis d'évaluer des plages d'exposition maximale aux champs d'induction magnétique de 50 Hz mesurés en microteslas (μ T) ;

- pour les « riverains non exposés » aux lignes électriques THT, qui sont cependant soumis aux émissions de 50 Hz des appareils électroménagers fonctionnant dans leur habitation, les mesures effectuées au centre des pièces ont révélé des valeurs allant de 0,05 à 0,10 μT ;
- pour les « riverains moyennement exposés » aux lignes électriques THT, les mesures ont révélé des valeurs allant de 0,10 à 1 μT , en tenant compte de l'intensité maximale du courant pouvant transiter dans les lignes électriques THT incriminées ;
- pour les « riverains très exposés » aux lignes électriques THT, les mesures ont révélé des valeurs allant de 1 à 10 μT , en tenant compte de l'intensité maximale du courant (en ampères) pouvant transiter dans les lignes électriques THT incriminées.

3.4.3.4 Discussion

La bibliographie répertoriée par le Criirem et rapportée dans son rapport ne reflète que très partiellement l'état de l'art de la question et la sélection des études considérées est manifestement biaisée.

Les personnes membres du comité de pilotage sont en majeure partie des membres d'associations en conflit avec la question des lignes très haute tension. L'indépendance de l'enquête ne peut en être qu'entravée.

Sur le livret de l'enquêteur, il est indiqué que le questionnaire « sera rempli par des équipes d'enquêteurs qui rencontreront les familles afin de récolter des données sur les conditions de vie à proximité des lignes de THT ». Or, lors de l'audition, les représentants du Criirem ont affirmé que les enquêteurs ne remplissaient en aucun cas ces questionnaires. De plus, ces coordinateurs et enquêteurs sont des personnes bénévoles des associations. Ils ont pu, sciemment ou non, orienter les réponses données par les familles. Le biais associé ne permet pas de considérer cette enquête comme une étude scientifique menée en toute rigueur. Le questionnaire aurait dû faire l'objet d'une validation préalable, ce qui n'a pas été mentionné. Il existe des études qui expliquent la différence et l'intérêt de l'utilisation d'un auto-questionnaire par rapport à un questionnaire validé et le biais que cela induit.

Les responsables du master dont dépendaient les étudiants ayant analysé les données nous ont informés que les travaux rendus par ceux-ci étaient assez inégaux. Les résultats obtenus n'ont manifestement pas fait l'objet d'une relecture par des experts scientifiques.

Il est important de préciser que la population dite « non exposée » est géographiquement localisée dans le fuseau d'étude retenu par RTE pour implanter la ligne THT Cotentin-Maine. Les personnes de cette « zone témoin » sont donc fortement concernées par les questions posées dans cette enquête, ce qui peut éventuellement avoir orienté les réponses aux différents questionnaires soumis par le Criirem et ajouter ainsi un biais supplémentaire à cette enquête.

Sur le plan de la méthodologie statistique, l'une des limites de l'enquête réside dans le caractère non aléatoire de l'échantillonnage. Cela ne permet pas d'extrapoler les résultats à des populations plus larges, en particulier aux populations riveraines de lignes HT ou THT. En effet, l'indication, dans la synthèse du Criirem, que « les sites soumis à enquête ont été [...] identifiés grâce à l'annuaire téléphonique » reste peu claire quant à l'objectif visé et ne permet pas de s'assurer de la constitution d'un échantillon aléatoire. De plus, les personnes figurant sur liste rouge (environ 20 % de la population) n'ont pas été prises en compte dans la réalisation de cet échantillon, ceci a pour conséquence un échantillonnage mal adapté pour une enquête d'opinion à but représentatif de l'avis des populations résidant à proximité de lignes THT.

Lors de la présentation du Criirem à l'Opecst le 29 janvier 2009, Pierre Le Ruz a précisé que l'effectif de la population exposée était de 3 000 personnes, tandis que celui des personnes non exposées était « supérieur à 1 000 ». L'effectif des personnes exposées est environ 3 fois supérieur à celui des non exposées, ce qui constitue une surreprésentation non négligeable de la

population dite exposée dans l'étude. Cette surreprésentation s'additionne à celle relative aux questionnaires « individuels » soumis en moyenne à 2 personnes par foyer. Ces deux éléments engendrent une perte de puissance statistique, biais majeur dans cette enquête.

Les questionnaires individuels distribués n'ont fait que relever les symptômes ressentis par les participants sans que jamais ne soient demandées des informations sur les antécédents médicaux ou la prise de médicaments. Aucune conclusion ne peut donc être tirée de ces données. Il en est de même en ce qui concerne le questionnaire portant sur les animaux d'élevage. De plus, ces questionnaires ouverts ne permettent pas de réaliser une exploitation standardisée.

Les réponses aux questionnaires concernant les lieux de travail ou les exploitations agricoles tentant d'obtenir des informations sur les « perturbations électroniques » ne peuvent être que très subjectives. Jamais le participant ne se voit détailler ou expliciter ce qu'est une perturbation électronique.

Le taux de réponse au questionnaire n'a pas été indiqué malgré sa nécessité dans l'interprétation des résultats d'une analyse statistique auprès d'un échantillon de populations.

De fait, les résultats de cette enquête ne peuvent être interprétés sans précaution d'une part et ne peuvent être considérés comme représentatifs de la population française riveraine des lignes THT d'autre part.

Il n'a pas été précisé à ce jour si les individus n'ayant pas souhaité répondre au questionnaire ont été comptabilisés pour l'analyse statistique des questionnaires ou non. Cette indication est fondamentale car elle pourrait induire une surreprésentation des personnes affectées par une pathologie et constitue donc un biais potentiel de l'étude.

Les mesures de champs ne sont en aucun cas réalistes (notamment celles effectuées sur le toit des habitations) et aucune conclusion sanitaire ne peut en être tirée. Le Criirem dit par ailleurs ne pas avoir mesuré les champs dans un plus grand nombre de foyers par manque de moyens et reconnaît que les résultats de ces mesures ne peuvent être représentatifs des 2 000 foyers étudiés.

Des mesures ont été faites dans une dizaine de fermes mais la vérification de la conformité des installations électriques n'a pas été faite en amont des mesures. Aucune conclusion ne peut être tirée de ces mesures.

Un courant entre 10 et 800 mA a été mesuré autour des cornadis²² sur certaines exploitations agricoles. Le Criirem compare ce courant au courant de contact à ne pas dépasser de 4 à 6 mA (préconisé par le rapport Bénétière) [Blatin et Bénétière, 1998]. Or, il aurait fallu mesurer une intensité de courant corporelle pour que ces deux valeurs soient comparables. Les auteurs de l'enquête ont confondu les 4 à 8 mA qui correspondent à une valeur d'intensité corporelle pouvant gêner les animaux avec un courant de boucle passant dans une armature métallique. Dans la majorité des cas, l'induction dans les masses métalliques peut être due aux champs produits par les lignes. Néanmoins, aucune étude scientifique ne démontre que ces intensités soient nuisibles pour les animaux. Les paramètres qui auraient dû être évalués sont la tension de la structure métallique par rapport à la terre (par une mesure) et l'intensité susceptible de traverser un animal qui vient au contact du métal (par application de la loi d'Ohm).

Lors de leur audition, les représentants du Criirem ont déclaré que les résultats qui montrent que la fréquence des perturbations électroniques est plus grande pour les personnes vivant près des lignes HT que pour les autres ne sont pas significatifs en raison de l'incertitude d'environ 10 % sur les résultats (incertitude estimée par le Criirem). Néanmoins, la gêne visuelle et auditive associée

²² Dispositif installé devant une auge ou un râtelier et destiné à limiter les mouvements des animaux lorsqu'ils sont en train de manger.

aux lignes haute tension est soulevée dans les résultats. L'exploitation de supposées « perturbations électroniques » pour des questions sanitaires ne relève d'aucun fondement scientifique, les interactions des champs électromagnétiques avec le corps humain étant bien différentes de celles avec les dispositifs électroniques.

3.4.3.5 Conclusion de l'analyse méthodologique de l'enquête du Criirem

Lors de leur audition, les représentants du Criirem ont reconnu que leur « Enquête citoyenne » ne se voulait pas être une étude scientifique mais avait pour objectif d'alerter les ministères concernés sur l'inquiétude de certaines populations concernant l'impact sanitaire des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

De nombreux biais méthodologiques ont été identifiés dans la réalisation et l'exploitation de cette enquête, ce qui limite considérablement l'interprétation de ses résultats et ne permet pas de valider scientifiquement ses conclusions.

3.4.4 Mesures de champ réalisées par Supélec

Tout équipement électrique ou électronique produit des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (50 Hz) et/ou à des fréquences plus élevées (harmoniques du 50 Hz et/ou radiofréquences) du fait de l'utilisation du courant alternatif pour alimenter ces équipements et de sources hautes fréquences pour synchroniser ou transporter l'information.

Le but de cette étude financée par l'Afsset était de caractériser le champ magnétique et le champ électrique à 50 Hz émis par un certain nombre de sources de la vie courante et d'examiner les variations de ces champs avec la distance. Il n'était pas possible d'être exhaustif, dans ce contexte, vu le nombre d'appareils électrodomestiques existants, c'est pourquoi des appareils utilisés par des personnels de Supélec ont été sélectionnés (four à micro-ondes, cuisinière électrique, téléviseur, bouilloire électrique, machines à laver la vaisselle, radios-réveils, etc.).

3.4.4.1 Méthodologie

Le protocole utilisé tend à représenter l'exposition d'une personne dans le contexte de la vie courante ; par exemple, pour un radio-réveil ou un téléviseur, les capteurs de mesure sont positionnés devant la face avant de l'appareil, sans chercher à maximiser le champ. Des mesures de champ (induction) magnétique et de champ électrique ont été réalisées en s'éloignant de l'appareil électrique testé d'une distance de 5 cm de la face utile de l'appareil jusqu'à une distance d'environ 1 m. Pour certains équipements, (cuisinière, lave vaisselle), il a été décidé de positionner les capteurs 20 cm au-dessus du plan horizontal de l'appareil, pour représenter une exposition majorante.

Supélec dispose de deux types d'équipements pour caractériser le champ électromagnétique à 50 Hz :

- l'appareil Narda EFA-300 qui permet de mesurer le champ électrique E et le champ magnétique (ou l'induction magnétique) H ;
- l'appareil Enertech Emdex II qui ne mesure que le champ magnétique (ou plus précisément l'induction magnétique B).

L'Emdex II est un appareil portable qui permet d'effectuer des mesures d'induction magnétique, dont les caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 15 et dont la photographie est présentée à la Figure 8 (Annexe 5). Toutes les mesures de champ magnétique ont été effectuées avec l'Emdex II, beaucoup plus pratique d'utilisation que le Narda EFA 300. Certaines mesures de champ magnétique ont été recoupées entre Emdex II et Narda avec une très bonne cohérence.

Les caractéristiques des appareils de mesure de champ sont présentées en annexe 5.

3.4.4.2 Résultats

Une synthèse de l'ensemble des mesures réalisées à une distance de 30 cm est présentée dans le Tableau 7 ci dessous. L'ensemble des résultats est présenté en annexe 6 de ce document.

Tableau 7 : Synthèse des mesures réalisées par Supélec

Fiche n°	Appareil	Champ (induction) magnétique B (μT)	Champ électrique E (V/m)
1	Radio-réveil A	0,08	16
2	Bouilloire électrique A	0,06	11
3	Grille-pain	0,21	10
4	Lave-vaisselle	0,21	9
5	Radio-réveil B	0,14	30
6	Machine à café expresso	0,7	8
7	Four à micro-ondes A	3,6	13
8	Cuisinière Mixte	0,2	6
9	Four à micro-ondes B	7	4
10	Table à induction	0,2	32
11	Sèche-cheveux	0,05	28
12	Alimentation de PC	0,02	25
13	Bouilloire électrique B	0,05	18
14	Téléviseur LCD 15 pouces	0,01 (ambiance)	75

Cette étude a permis de confirmer la décroissance rapide avec la distance du champ magnétique et du champ électrique produits par les appareils électrodomestiques testés (en général, à 1 m, le champ électrique ou magnétique est quasiment négligeable - il est dans la plupart des cas assez faible à 30 cm - sauf pour les deux fours à micro-ondes testés qui se distinguent par des valeurs supérieures à 1 μT, mais inférieures à 10 μT en champ magnétique, et des valeurs faibles de champ électrique à la même distance.

Certains appareils créent un champ électrique relativement élevé à faible distance alors que ce n'est pas le cas pour d'autres. Les explications possibles sont liées à la consommation électrique, à la structure et au câblage des appareils. Par exemple, le four à micro-ondes consomme une puissance de plus de 1 kW et est équipé pour son alimentation d'un transformateur de puissance basse / haute tension. Ce transformateur peut induire, en fonctionnement, un champ magnétique important de plusieurs dizaines de μT à quelques centimètres. Ce champ magnétique décroît rapidement avec la distance comme on peut le constater à l'annexe 6 de ce document.

En ce qui concerne le champ électrique basses fréquences, c'est surtout le câblage de l'appareil qui va être critique du fait en particulier des différences de potentiel à basses fréquences entre des éléments de câblage. L'influence du courant sur le champ électrique est quasiment négligeable. En effet, il y a assez peu de différences entre la mesure de l'appareil alimenté et en

fonctionnement et celle de l'appareil alimenté et éteint. Un champ électrique plus élevé peut même être constaté lorsque l'appareil est simplement alimenté mais éteint.

Pour approfondir cette étude, il pourrait être intéressant de réaliser des cartographies détaillées du champ magnétique et/ou électrique autour de certains appareils qui semblent produire les niveaux les plus importants. Il est possible d'analyser également plus en détail les composantes harmoniques du champ à 50 Hz car certains appareils peuvent produire des niveaux d'harmoniques non négligeables du fait de non linéarités dans les circuits électroniques actifs (composantes du redressement pour fournir les tensions continues nécessaires au fonctionnement, par exemple). Ceci pourrait se faire en laboratoire sur quelques appareils pour compléter cette étude.

4 Effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences – synthèse de l'expertise internationale

4.1 Rappels méthodologiques

L'étude du danger potentiel d'un agent est, par principe, du ressort de la toxicologie (études expérimentales *in vitro* ou *in vivo*) ou de l'épidémiologie.

4.1.1 Les études expérimentales *in vivo* et *in vitro*

Les effets biologiques des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences sur le vivant peuvent être examinés à plusieurs niveaux :

- *in vitro* sur des cellules humaines, animales, végétales ou des bactéries en culture ;
- *in vivo* sur des animaux ou des humains.

Les études *in vitro* et *in vivo* sont réalisées pour comprendre les effets d'un agent (ici les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences) sur des mécanismes métaboliques, des fonctions physiologiques ou des altérations des systèmes vivants. Les études *in vivo* et *in vitro* sont complémentaires.

L'avantage majeur apporté par les études *in vitro* est la compréhension des mécanismes cellulaires et moléculaires d'action de ces champs, comme le soulignent le Scenihhr [SCENIHR, 2009], le rapport à la DGS du CSHPF [CSHPF, 2004], les monographies de l'Icnirp [ICNIRP, 2003] et de l'OMS [WHO, 2007] et l'expertise européenne [EMF-NET, 2008]. Le CIRC [IARC, 2002], quant à lui, soulève la question de la transposition au vivant et donc, à l'homme. En effet, les études *in vitro* ne permettent pas de tirer des conclusions directes quant à la présence des effets rapportés dans un organisme entier. Un autre désavantage des études *in vitro* dans la recherche des effets des champs extrêmement basses fréquences est l'absence de reproductibilité des études cellulaires entre plusieurs laboratoires, voire même à l'intérieur d'un même laboratoire. L'OMS émet l'hypothèse qu'une dérive génotypique ou phénotypique des lignées cellulaires pourrait gêner la reproductibilité d'une étude d'un laboratoire à l'autre [WHO, 2007]. Le problème de la reproductibilité des études est également mis en avant dans le rapport remis à la DGS [CSHPF, 2004] qui souligne l'obtention de résultats contradictoires d'un laboratoire à l'autre alors qu'ils suivent pourtant le même protocole d'études et travaillent sur le même type de matériel cellulaire.

4.1.2 Les études épidémiologiques

L'épidémiologie consiste à analyser la fréquence des maladies d'une population, leur répartition dans le temps et dans l'espace et les facteurs susceptibles de les engendrer. Les facteurs, dits de risques, sont le plus souvent désignés par le terme générique d'exposition.

Tous les différents types d'études épidémiologiques n'apportent pas le même niveau de preuve. On distingue classiquement les études écologiques, les études transversales, les études cas-témoins et les études de cohortes :

- les études écologiques ont la particularité d'examiner l'association entre exposition et pathologie par des données agrégées d'exposition et de pathologies (pollutions moyennes par communes et affections respiratoires associées par exemple) ;
- les études transversales consistent à examiner à un instant donné à la fois les expositions de la population étudiée et les pathologies ;
- les études cas-témoins consistent à comparer un échantillon de cas d'une pathologie donnée à un échantillon dit témoin, de personnes non atteintes de cette pathologie ;
- enfin, une étude de cohorte consiste à comparer des individus exposés à un agent particulier et des individus non exposés (ou des groupes de personnes exposées à différents niveaux d'exposition) en suivant dans le temps l'apparition des pathologies pour chaque groupe.

Les indicateurs de risques les plus utilisés en épidémiologie sont :

- le risque relatif (RR), rapport entre la probabilité d'être atteint d'une pathologie pour les individus exposés et la probabilité d'être atteint pour les non exposés ;
- l'odds ratio (OR) (« rapport des cotes »), équivalent au risque relatif dans le cas des pathologies rares. Il permet d'estimer ce dernier lorsque les probabilités ci-dessus ne sont pas estimables, notamment dans le cas des études cas-témoins ;
- le rapport de mortalité ou d'incidence²³ standardisé (SMR : *Standardised Mortality Ratio* ou SIR : *Standardised Incidence Ratio*). Il rapporte le nombre de décès (ou cas pour le SIR) observés au nombre attendu si la mortalité de la population étudiée était la même que celle de la population de référence.

Pour ces trois indicateurs, la valeur 1 correspond à un risque égal entre les populations comparées. Les valeurs supérieures (respectivement inférieures) correspondent à un risque supérieur (respectivement inférieur) dans la population exposée.

Aux principaux protocoles cités plus haut, il faut ajouter la méta-analyse qui consiste à synthétiser l'ensemble des études publiées. Initialement développées pour synthétiser les études expérimentales, les méta-analyses ont été employées également pour les études observationnelles. Étant, en apparence, facilement réalisables avec de simples logiciels dédiés, on observe un nombre grandissant de publications utilisant les méta-analyses comme simple regroupement de risques relatifs (ou d'OR) pour produire un RR global et son intervalle de confiance. Contrairement aux analyses conjointes (*pooled analysis*), elles ne considèrent pas dans les calculs les données individuelles de base. Si elles permettent d'apporter des éléments quantitatifs synthétiques, elles doivent être réalisées avec précaution et notamment après un examen préalable de l'hétérogénéité entre les études.

Les biais peuvent être importants dans les études épidémiologiques. Ce sont notamment des biais de sélection [IARC, 2002]. En effet, la sélection des groupes témoins est difficile puisque, par exemple dans le cas des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, toute la

²³ L'incidence correspond au nombre de nouveaux cas d'une pathologie donnée survenus dans une période donnée. Elle s'oppose à la prévalence qui inclut tous les cas dénombrés dans la période indépendamment de leur moment d'apparition.

population est soumise à de tels champs dans la vie quotidienne. De même, l'influence du faible nombre de sujets est un handicap à la conclusion des études [CSHPF, 2004]. En effet, le nombre de sujets inclus dans une étude conditionne pour une bonne partie la transposition qui peut être faite des résultats à la population générale. De ce fait, s'il n'y a qu'un nombre réduit de sujets dans l'étude, celle-ci n'est peut-être pas représentative de la population générale.

4.2 Interaction des champs électromagnétiques avec les tissus biologiques

4.2.1 Introduction

La connaissance des interactions des champs électriques et magnétiques avec les tissus biologiques est le point le plus fondamental de la question de leurs effets biologiques et sanitaires. Cette connaissance est une des étapes indispensables à la validation des effets biologiques, pour apporter la compréhension des processus physiopathologiques et juger de la réalité des effets sanitaires allégués. La validation d'effets biologiques prenant en compte une « dosimétrie » aussi précise que possible permet de définir les seuils d'apparition des effets. Par conséquent, on en déduit les « doses »²⁴ sans effet (*no effect level*), paramètre fondamental de l'évaluation toxicologique chimique, transposable à la démarche de définition de valeurs limites d'exposition à un phénomène physique. Les tissus biologiques, en tant qu'éléments matériels, sont soumis aux lois de la physique et de la chimie et les actions des champs sur la « matière vivante » ne peuvent être expliquées que par l'application stricte des lois établies dans les sciences de la matière.

Il reste fondamental de prendre en considération les trois sources de données que sont les études *in vitro*, sur fractions subcellulaires, cellules et organes isolés, les études *in vivo* sur l'animal de laboratoire et les données cliniques, en particulier celles de l'épidémiologie. Pour être validées, ces données doivent présenter un haut degré de cohérence entre elles et répondre à la condition d'être expliquées par un même mécanisme d'interaction (voir définition dans le Tableau 8). Concernant l'effet sanitaire le plus préoccupant, le cancer, et plus particulièrement les leucémies de l'enfant, l'épidémiologie conduit à souligner la possibilité d'un effet des champs magnétiques. Les études *in vitro* et les études animales conduisent à des conclusions conflictuelles. Le fait de ne pas encore avoir identifié et confirmé le mécanisme en cause n'autorise pas d'écarter un effet possible de l'environnement, mais la démonstration d'une interaction non réfutable du point de vue physico-chimique permettrait de clarifier cette question.

Tableau 8 : Définition du terme « mécanisme » par ses propriétés et ses usages (d'après [Foster, 2003], modifié)

Un mécanisme d'interaction doit être :

- argumenté par une solide preuve physico-chimique ;
- décrit par des équations ou autres relations paramétriques ;
- vérifié chez l'homme ou pouvant être avec confiance extrapolé aux humains à partir des données animales ;
- cohérent avec les effets biologiques connus ;

²⁴ Cette notion de dose, qui ne doit pas être confondue avec la dose utilisée dans le domaine des rayonnements ionisants, se réfère plutôt à une notion d'intensité seuil. Les effets des expositions aux rayonnements non ionisants ne se cumulent pas, *a priori*.

- utilisable pour prédire un effet biologique ou un effet sanitaire ;
- accepté largement par la communauté scientifique.

4.2.2 L'action des champs électromagnétiques sur les tissus biologiques

Les effets des champs électrique et magnétique vis-à-vis de la matière et des tissus varient en fonction de leur fréquence et de leur intensité.

Vis-à-vis des tissus biologiques, les champs électrique et magnétique peuvent avoir deux types d'interactions : d'une part des interactions directes, qui supposent qu'il existe dans l'organisme des éléments (organes, cellules, molécules, etc.) sensibles à leur action, des cibles, et d'autre part des interactions indirectes qui résultent des courants qui pourront être induits par ces champs dans le milieu conducteur qu'est l'organisme vivant. Dans ce cas, l'interaction résulterait de l'action du courant induit sur les éléments biologiques.

En l'état actuel des connaissances, la majorité des effets connus des champs extrêmement basses fréquences résulte de courants induits. Pour cette raison, ces interactions indirectes seront envisagées en premier lieu.

4.2.3 Mécanismes indirects impliquant des courants induits

Les champs de basses fréquences, autres que les champs statiques, sont susceptibles du fait de leur variation périodique, d'induire des courants dans la matière et dans les tissus biologiques. Ce processus d'induction est aussi désigné sous le terme de « couplage ». Ces mécanismes sont développés plus en détail dans l'annexe 4.

Les courants induits sont, en principe, susceptibles de produire par effet Joule un échauffement des tissus traversés. Il peut s'ensuivre des effets qualifiés de « thermiques », principaux mécanismes d'action des champs de fréquences très élevées. Cependant, dans le cas des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, l'énergie transmise à distance des conducteurs est extrêmement faible. Le nom de « rayonnement » donné fréquemment aux champs électromagnétiques est en grande partie injustifié dans ce cas, car, contrairement aux radiofréquences, les conducteurs de 50 - 60 Hz ne rayonnent que très peu d'énergie. Une ligne de transport de 500 MW rayonne moins de 20 μ W soit 20×10^{-12} % de l'énergie transportée. De ce fait, l'énergie disponible dans les objets situés à distance, notamment dans les tissus, est particulièrement faible et n'est pas susceptible d'entraîner un échauffement de ces derniers. Elle est évaluée à $1,3 \times 10^{-10}$ W/kg [Valberg *et al.*, 1997]. Qui plus est, la valeur de la longueur d'onde (5000 à 6000 km) ne permet pas à l'énergie transférée de se focaliser en un point particulier de l'organisme. L'élévation thermique qui pourrait en résulter dans le corps d'un sujet humain est estimée à $1,5 \cdot 10^{-8}$ °C par jour, pour des champs E de 1 kV/m et M de 0,1 mT, soit un ordre de grandeur de 1^{-10} fois l'énergie produite par le métabolisme [Valberg *et al.*, 1997].

Que le champ externe soit électrique ou magnétique, il a comme conséquence de créer des courants qui circulent dans la périphérie du corps pour le champ électrique et dans sa totalité pour le champ magnétique. Les champs électriques internes induits sont susceptibles d'exercer des forces, et donc des effets de mobilisation (attraction, répulsion) ou de déformation sur des éléments chargés, tels que des ions ou des protéines. Ces dernières ont fait l'objet d'une grande attention car elles jouent des rôles fonctionnels de premier plan, en tant qu'enzymes, récepteurs et protéines canalaire.

La possibilité pour le courant électrique de stimuler les tissus excitable (muscles, nerfs) est connue depuis le XIX^e siècle. Les acquis de la physiologie montrent que, dans les conditions normales, ces organes utilisent des phénomènes électriques qui leur sont propres pour assurer leur fonctionnement. L'étude de ces phénomènes électriques cellulaires a permis de les décrire, de les quantifier et d'en connaître les lois. Il est donc tout à fait logique de s'interroger sur les interactions des champs électriques et magnétiques de l'environnement avec les organes

excitables qui tirent leur excitabilité de phénomènes électriques cellulaires. Dans ces organes excitables, l'excitation physiologique résulte de l'activité de dispositifs membranaires particuliers : les canaux voltage dépendants (*voltage gated channels*).

L'excitation d'une cellule nerveuse par un courant électrique est certes fonction de son intensité (avec un effet de seuil de type « tout ou rien »), mais aussi de paramètres tels que la durée d'application du stimulus ou, dans le cas d'un stimulus itératif, de sa fréquence de répétition. Ces notions sont décrites en physiologie sous les noms de :

- relation intensité/durée ;
- relation intensité/fréquence (qui comporte elle-même l'influence de la vitesse d'établissement du courant et d'une propriété de la cellule décrite sous le terme d'accommodation).

Il est établi de longue date que la réponse d'un nerf à des stimulations alternatives est la meilleure (excitabilité maximale) dans la partie basse de la gamme des fréquences extrêmement basses (moins de 100 Hz) [Laget, 1970] par le jeu des deux relations signalées plus haut (relations intensité/durée et intensité/fréquence). La modélisation mathématique de ces relations confirme ces données [Foster, 2003]. L'évaluation sur un effet de physiologie sensorielle pouvant donner lieu à quantification chez l'homme (le seuil d'apparition des phosphènes par exemple) permet de situer la fréquence optimale de réponse à 20 Hz [Taki *et al.*, 2003].

De tous les tissus, les éléments nerveux sont les plus réactifs à la stimulation électrique. L'action des courants induits est relayée au niveau cellulaire par les structures qui sont physiologiquement responsables de la production ou de la propagation de l'influx nerveux, les canaux ioniques voltage dépendants (*voltage gated channels*). La stimulation de nerfs peut se produire si le champ électrique local est supérieur à 5 - 25 V/m.

Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs peuvent, au-dessus d'un certain seuil, déclencher la formation de potentiels d'action dans les neurones. Une densité de courant d'environ 10 - 20 A/m² est nécessaire pour induire des potentiels d'action. Pour des neurones de grande longueur, orientés parallèlement au vecteur de la densité de courant, des courants de plus de 1 - 2 A/m² sont nécessaires. À 50 - 60 Hz, il faut une exposition corporelle à environ 100 mT pour obtenir cette densité de courant. Un champ de 100 µT produit le millième de cette densité de courant liminaire [Valberg *et al.*, 1997].

L'effet d'excitation des éléments nerveux peut donner lieu à des effets biologiques, dont le plus évident est la perception du champ électrique et aux phénomènes décrits sous le nom de phosphènes. Ces phénomènes résultent de la stimulation de parties à la fois plus exposées et plus excitables du système nerveux.

Le champ électrique ne pénètre que très peu les organismes mais il induit des courants à la surface du corps, dans le tissu très richement innervé qu'est la peau. La perception tactile qui en résulte est le principal effet biologique du champ électrique. Elle est démontrée chez l'homme et chez l'animal, apparaît pour des valeurs dont l'ordre de grandeur se situe dans la gamme de 5 à 10 kV/m et elle est susceptible d'induire des modifications comportementales. L'exposition au champ magnétique, en revanche, ne produit pas d'effet de perception. L'annexe 4 présente plus en détails ces questions.

4.2.4 Mécanismes directs impliquant une cible

Les possibilités pour des champs électromagnétiques d'interagir avec la matière vivante par un moyen direct, c'est-à-dire ne mettant pas en jeu des courants induits, impliquent la présence dans les tissus de structures sensibles à ces champs. Il s'agit de cibles, pouvant jouer le rôle de transducteurs. Dans les faits, ce mode d'action « direct » concerne exclusivement le champ magnétique.

Le champ électrique pénètre peu les tissus et on lui connaît peu d'éléments récepteurs spécifiques. Un exemple est donné par les plaques olfactives de certains insectes (abeilles) [Erickson, 1982]. Ces plaques qui se comportent comme des électrets²⁵ ont fait l'objet d'hypothèses relatives à la perception des odeurs. De tels dispositifs ne sont pas retrouvés chez les vertébrés.

L'action directe des champs sur les tissus concerne donc essentiellement le champ magnétique pour lequel deux types de cibles ont été identifiées, la magnétite, élément subcellulaire pouvant se comporter comme une aiguille aimantée, et des molécules ou particules produites par certaines réactions chimiques appelées, en fonction de leurs propriétés et de leur devenir, des « radicaux libres²⁶ ». Ces deux catégories de cibles, de tailles très différentes selon qu'il s'agit d'organelles ou de molécules, ont été impliquées comme transducteurs dans des mécanismes de perception des champs magnétiques jouant un rôle fonctionnel pour les animaux qui en sont dotés. En l'état actuel des connaissances, cette magnétoréception ne concerne que la possibilité pour les animaux de percevoir le champ magnétique terrestre (ou champ géomagnétique). La différence d'échelle et la nature des mécanismes justifie de distinguer magnétoréception physique et magnétoréception chimique.

Ces mécanismes sont développés de façon plus complète dans l'annexe 4.

4.3 Synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Le chapitre ci-dessous est la synthèse des principaux travaux de l'expertise internationale disponible et relative aux effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, répertoriés depuis le rapport rendu à la DGS en 2004.

4.3.1 Choix des publications étudiées

Les effets potentiellement provoqués par une exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences représentent une préoccupation importante de la communauté scientifique. De nombreux groupes de recherche et organismes internationaux se sont intéressés à cette problématique. Nous prendrons comme point de départ un rapport remis à la DGS en 2004 [CSHPF, 2004] puis les différents rapports internationaux que sont les rapports du programme européen EMF-NET (2004 à 2009), ceux du Scenihp (2007 et son actualisation en 2009) ainsi que des documents de l'OMS (Aide-mémoire n°296, 2005 [OMS, 2005] ; *Environmental health criteria* n°238, 2007 [WHO, 2007]). Plusieurs publications scientifiques d'importance ont également été analysées (méta-analyses, analyses poolées et revues), à l'exception d'une revue complète de la

²⁵ Un électret est un matériau diélectrique présentant un état de polarisation électrique quasi permanent.

²⁶ Les radicaux libres sont des molécules instables qui, lorsqu'elles ne sont pas neutralisées par des anti-oxydants, endommagent de manière irréversible les principaux constituants des cellules de l'organisme.

bibliographie disponible en matière d'articles publiés dans des revues à comité de lecture, concernant des effets ou études isolées. La monographie du CIRC [IARC, 2002], bien qu'antérieure à 2004, a été prise en compte car elle est une référence importante des rapports présentés dans cette synthèse.

4.3.1.1 Rapport à la DGS (2004)

En 2004, la DGS a demandé à un groupe d'experts rattaché par la suite au CSHPF qu'un rapport sur les champs magnétiques extrêmement basses fréquences soit élaboré. Ce travail s'est inscrit dans la continuité des conclusions du CIRC [IARC, 2002] qui a classé les champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B, en raison des incertitudes qui subsistent en ce qui concerne la leucémie infantile. Le but de ce rapport de 61 pages était de préciser des recommandations éventuelles de surveillance et de programmes de recherche et de quantifier le risque pour la population. Se basant sur plusieurs publications, dont le rapport Doll [AGNIR, 2001], le rapport RAPID [NIEHS, 1998], la monographie du CIRC, deux rapports du *Health Council of the Netherlands* et un rapport de l'Icnirp (livre bleu), les experts ont essentiellement traité de la problématique des leucémies infantiles et des champs magnétiques extrêmement basses fréquences.

4.3.1.2 Rapport OMS (2007)

Le rapport de l'OMS [WHO, 2007] constitue un document très complet de plus de 500 pages. Chaque catégorie de troubles a été traitée indépendamment par des groupes d'experts spécifiques. Selon l'OMS, « cette monographie représente l'évaluation des risques sanitaires la plus complète actuellement disponible sur les champs électriques et magnétiques extrêmement basses fréquences²⁷ ».

4.3.1.3 Rapports du Scenihp (2007 et actualisation de 2009)

Dépendant de la Commission européenne, le Scenihp est un comité scientifique dont le but est de lui fournir des avis scientifiques et de l'alerter sur les risques sanitaires émergents ou nouvellement identifiés. Ce comité est constitué d'experts extérieurs à la Commission, dans un souci de transparence et d'indépendance. L'objet du rapport de 2009 (80 pages dont 10 environ sur les champs magnétiques extrêmement basses fréquences) est principalement de mettre à jour l'avis précédent datant de 2007. C'est pourquoi le Scenihp a d'abord fait une recherche de toutes les publications parues dans des revues à comité de lecture, en termes de mesures d'exposition, d'études épidémiologiques et d'études expérimentales, avant de se focaliser sur les articles apportant des informations nouvelles par rapport à l'opinion précédente. Un tri a également été fait sur la qualité des publications. Les études non rigoureuses méthodologiquement ou celles dont les données ne pouvaient pas être vérifiées n'ont pas été prises en compte dans ce rapport.

4.3.1.4 Rapport du projet EMF-NET (2004-2009)

Mis en place en 2004 pour une durée de 4 ans, le projet européen EMF-NET (6^{ème} PCRD) regroupe également de nombreux experts. Il avait pour but de fournir aux autorités européennes les éléments scientifiques nécessaires pour définir une politique concernant les champs électromagnétiques. Il comporte un groupe d'experts travaillant sur les études de laboratoire (*in vivo* et *in vitro*) et un autre travaillant sur les études épidémiologiques. C'est pourquoi deux rapports différents et indépendants existent : l'un publié en 2008 de 48 pages et portant sur les études de laboratoire et l'autre en 2009 de 15 pages, dont 6 sur les extrêmement basses fréquences, portant sur les études épidémiologiques. Ces documents ne constituent pas une revue

²⁷ "This monograph represents the most thorough health risk assessment currently available on extremely low frequency electric and magnetic fields."

exhaustive de la littérature puisque ce sont des actualisations périodiques des données disponibles.

4.3.1.5 Rapport BioInitiative (2007)

Le rapport BioInitiative, publié en 2007, n'a pas été retenu comme un travail d'expertise collective car il s'agit d'un document de synthèse non commandé par un organisme d'état ou de santé publique, non exhaustif et dont l'évaluation du risque n'est pas collégiale. Il a fait l'objet de commentaires par différents organismes. Le *Health Council of the Netherlands* conclut, dans son avis du 2 septembre 2008, que « le rapport BioInitiative n'est pas le reflet objectif et équilibré des connaissances scientifiques actuelles » et que, par conséquent, « le rapport ne fournit aucune raison de revoir les opinions actuelles quant aux risques d'exposition aux champs électromagnétiques ». Les experts du programme européen EMF-NET concluent quant à eux, dans leur commentaire du 30 octobre 2007, qu'« il y a un manque d'équilibre dans le rapport, aucune mention n'est faite des rapports qui ne sont pas d'accord avec les déclarations et les conclusions des auteurs » et que « les résultats et les conclusions sont très différents de ceux des dernières études nationales et internationales sur ce sujet ».

4.3.1.6 Rapport de l'Office fédéral de l'environnement suisse (2010)

Le 19 janvier 2010, l'Office fédéral de l'environnement suisse (OFEV ou BAFU en allemand) a publié un rapport d'expertise [BAFU, 2010]. C'est une mise à jour de l'évaluation du risque de cancer lié aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences. Il est basé en premier lieu sur la monographie de l'OMS de 2007 [WHO, 2007] mais également sur la monographie du CIRC de 2002 [IARC, 2002] de même que sur des études publiées entre janvier 2004 et août 2008 et non prises en compte dans la monographie de l'OMS. Ces études sont des revues ou des études isolées de données *in vitro*, *in vivo* ou épidémiologiques. Ce rapport, publié tardivement dans le calendrier de réalisation de la présente expertise, n'est pas détaillé ici, il corrobore par ailleurs les conclusions de l'OMS établies en 2007 [WHO, 2007].

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Cancer

Le fait que les champs magnétiques extrêmement basses fréquences augmenteraient le risque de cancer a fait l'objet de nombreuses études épidémiologiques ou expérimentales. À la base de ces études, on retrouve la suggestion d'une relation entre la leucémie infantile et l'exposition à ces champs par Wertheimer et Leeper en 1979 [Wertheimer et Leeper, 1979]. Suite à cette publication, un grand nombre d'études ont cherché à reproduire ce résultat. Les conclusions similaires d'autres études publiées ensuite ont conduit le CIRC à classer les champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B, celle des substances « peut-être cancérogènes pour l'homme ». Les données sur le cancer des rapports d'expertise étudiés sont présentées d'abord en exposant les résultats des études biologiques, puis de l'épidémiologie.

4.3.2.1.1 Études in vitro

Le rapport remis à la DGS en 2004 [CSHPF, 2004] fait une synthèse rapide des études cellulaires concernant la cancérogénicité des champs extrêmement basses fréquences de la manière suivante : « la grande majorité des études sur la cellule a montré une absence d'effets génotoxiques et mutagènes des champs EBF ».

En 2007, l'OMS [WHO, 2007] a majoritairement basé son rapport sur les données du CIRC pour ce qui est de la cancérogénicité des champs extrêmement basses fréquences. Il rapporte que des études sont en cours sur les interactions possibles avec l'ADN. Les résultats n'ayant pas encore été évalués, il n'est pas possible de conclure quant à l'existence ou non d'un effet de ces champs. Cette conclusion est renforcée par le caractère inhomogène des résultats disponibles.

L'OMS note qu'aucun effet génotoxique n'a été mis en évidence pour des champs extrêmement basses fréquences dont l'intensité est inférieure à 50 mT. L'OMS note néanmoins que certaines conditions d'exposition pourraient aboutir à des effets génotoxiques, notamment la durée de l'exposition et l'intensité de l'induction magnétique ($> 100 \mu\text{T}$). Le rôle de l'intermittence du signal (*on / off*), qui baisserait le seuil d'apparition d'effets génotoxiques à $35 \mu\text{T}$, reste controversé. De plus, la possibilité de l'existence d'interaction avec des agents génotoxiques connus (physiques ou chimiques) est réaffirmée, même si les expositions correspondantes ne relèvent pas de l'environnement. L'incertitude de l'existence ou non d'effets des champs extrêmement basses fréquences *in vitro* à des niveaux de champs faibles persiste [WHO, 2007].

Le Scenihhr [SCENIHR, 2009] rapporte que les données *in vitro* disponibles n'appuient pas les études épidémiologiques en faveur d'une augmentation du risque de leucémie chez l'enfant sous l'influence des champs extrêmement basses fréquences. En revanche, elles ne permettent pas non plus de conclure à l'absence d'effet.

La possibilité que des champs extrêmement basses fréquences d'intensité supérieure à $100 \mu\text{T}$ augmentent les effets d'agents connus (par exemple des agents génotoxiques ou oxydants) est mentionnée par tous les rapports de façon récurrente. Une revue récente appuie cette conclusion [Juutilainen, 2008]. Elle ne permet pas pour autant d'expliquer les données épidémiologiques, les densités de flux magnétiques impliquées étant très supérieures (≥ 250 fois) aux plus fortes densités de flux rencontrées dans l'environnement. En 2004, le rapport à la DGS présentait ce seuil de $100 \mu\text{T}$ comme une hypothèse qui restait à vérifier. Ainsi, dans son rapport de 2009, le Scenihhr conclut que les études *in vitro* ont montré des effets des champs extrêmement basses fréquences à partir de ce seuil de $100 \mu\text{T}$. Cette valeur de champ est très supérieure aux niveaux d'exposition rapportés dans les études épidémiologiques (de l'ordre de quelques μT) [Scenihhr, 2009].

En 2008, le programme européen EMF-NET a publié une revue très complète sur le sujet. Les conclusions de ce rapport sont que, pour les études cellulaires, les preuves de l'existence d'effets génotoxiques ou non génotoxiques liés au cancer sont limitées. Il rapporte cependant une potentialisation des effets cancérigènes de certains inducteurs chimiques ou physiques par les champs magnétiques extrêmement basses fréquences [EMF-NET, 2008]. L'OMS souligne également que cette hypothèse doit être testée plus avant [WHO, 2007].

Ainsi, les conclusions des différents rapports présentés ici sont globalement semblables. En effet, à l'examen des publications portant sur des effets *in vitro* des champs extrêmement basses fréquences, ils rapportent tous un manque de données ne permettant pas de conclure quant à la présence ou non de tels effets.

Cas de la monographie du CIRC [IARC, 2002] :

La monographie du CIRC présente un grand nombre d'études *in vitro*. On remarque que de nombreux types cellulaires sont utilisés dans les études présentées par le CIRC (donneurs humains, prélèvement sur animaux ou lignées cellulaires). En ce qui concerne les effets, aberrations chromosomiques et échanges de chromatides sœurs par exemple, les études rapportées par le CIRC montrent que les résultats ne sont globalement pas en faveur d'une association avec les champs extrêmement basses fréquences. Cependant, des études suggèrent que ces champs pourraient affecter la prolifération cellulaire et modifier la réponse de la cellule à différents facteurs (par exemple, la mélatonine). Un autre effet concerne l'apoptose qui, dans plusieurs types cellulaires, fait suite à différentes conditions d'exposition. Enfin, il est important de noter que, malgré les nombreuses études portant sur les effets des champs extrêmement basses fréquences sur la signalisation cellulaire, les données disponibles sont contradictoires. Globalement, les informations recueillies et présentées dans cette monographie sont très complètes. La conclusion générale est que le manque de validation des résultats de ces études par des laboratoires indépendants ne permet pas d'aboutir à une conclusion.

Cas des revues :

Une revue récente, considérant la totalité de la littérature de 1993 à 2004, aboutit à une conclusion similaire [Vijayalaxmi et Prihoda, 2009]. Cette revue conclut que pour les études montrant des effets génotoxiques, qui sont minoritaires, l'amplitude des lésions reste généralement dans l'amplitude des variations de base historiques. En revanche, une autre revue aboutit à une conclusion opposée – les champs magnétiques extrêmement basses fréquences sont cancérigènes – sur la base d'une littérature sélectionnée sur les 50 dernières années [Santini *et al.*, 2009]. La conclusion de cette revue est basée sur des études *in vitro* seulement, après sélection des études montrant des effets toxiques, de type génotoxique en particulier. Les auteurs ne considèrent donc pas les études animales. Pour expliquer que certaines études ne montrent pas d'effet, ils déclarent qu'elles utiliseraient des techniques et/ou des cellules peu ou pas sensibles. Cependant, les techniques les plus sensibles ont été utilisées dans les études ne montrant pas d'effet et des différences génétiques dans les cellules issues d'une même lignée n'ont jamais amené des résultats contradictoires avec les rayonnements ionisants par exemple. Cette revue a été réalisée avec un biais de sélection et n'a pas été basée sur le poids de la preuve.

Conclusion :

Ainsi, l'expertise internationale estime dans son ensemble que les données *in vitro* sont très hétérogènes et manquent de validation. De plus, le degré de preuve est insuffisant pour suggérer un effet cancérigène, de type initiateur, pour des champs extrêmement basses fréquences d'intensité inférieure à 50 mT. Cette conclusion est conforme à celle du CIRC [IARC, 2002].

4.3.2.1.2 Études *in vivo*

La cancérigénicité des champs extrêmement basses fréquences a fait l'objet de nombreuses études *in vivo*. Les études animales sont d'ailleurs majoritairement représentées dans les rapports, alors que celles sur l'homme sont très peu nombreuses. L'effet le plus recherché est le risque de leucémie infantile, suite à la publication de Wertheimer et Leeper [Wertheimer et Leeper, 1979].

L'OMS [WHO, 2007] soulève le problème de la mise en évidence *in vivo* de la relation pouvant exister avec la leucémie infantile la plus commune, la leucémie lymphoblastique aiguë (LLA). En effet, il n'existe actuellement aucun modèle animal spécifique de cette pathologie, les modèles existants reproduisent des leucémies de l'adulte comme les lymphomes. La conclusion de l'OMS n'en reste pas moins identique à celle du CIRC au niveau de la classification des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B.

Le Scenihhr [SCENIHR, 2009] suggère que les champs extrêmement basses fréquences pourraient agir par co-cancérigénicité avec un autre agent car il n'existe aucune preuve que ces champs soient seuls en cause. Les études rapportées dans la monographie du CIRC [IARC, 2002] concernent principalement l'interaction des champs avec des facteurs chimiques ou physiques. Seules quelques études où les champs extrêmement basses fréquences interviennent seuls sont présentées. L'OMS soutient l'hypothèse d'une co-cancérigénicité en recommandant de faire attention à une synergie possible avec un autre facteur [WHO, 2007]. Cependant, il met en avant le fait que seul un groupe de recherche a montré une action synergique avec un facteur externe alors que deux groupes de recherche différents n'ont pas mis en évidence une telle action. Le Scenihhr rapporte, de plus, que d'autres études positives existent. Cependant, toutes sont contestées notamment en raison des biais méthodologiques qui les caractérisent (petite taille des échantillons ou choix non pertinent de l'espèce animale). Une autre étude portant sur l'induction de la prolifération de cellules de l'épithélium mammaire par co-exposition au diméthylbenzanthrène (DMBA) a mis en évidence une augmentation significative de cette prolifération. Cependant, une seule souche de rat (Fischer 344) a montré un résultat positif ce qui ne permet pas de conclure quant à l'effet de l'exposition aux champs extrêmement basses fréquences sur un tel paramètre [Fedrowitz et Löscher, 2008]. Enfin, une dernière étude positive est présentée, mettant en avant l'augmentation significative du nombre de micronoyaux dans des cellules de moelle osseuse de

rats Wistar. Le nombre d'animaux dans cette étude est relativement faible (quatre par groupe) [Erdal *et al.*, 2007]. Ce rapport ne remet pas en cause la conclusion du CIRC car les études positives sont peu nombreuses et possèdent des biais.

Les conclusions du rapport remis à la DGS en 2004 sont très détaillées, de même que celles de l'OMS. Aucune initiation d'un processus cancérogène n'est mise en évidence de même qu'aucune altération de l'ADN ni aucune mutation [CSHPF, 2004]. En effet, des études à grande échelle sur rongeurs n'ont pas montré d'augmentation du nombre de cancers et aucun effet génotoxique sur souris [WHO, 2007]. Ces deux rapports examinent aussi plus particulièrement les effets des champs extrêmement basses fréquences sur les tumeurs mammaires. Le rapport à la DGS ne retient pas l'hypothèse d'une augmentation du risque de ces tumeurs dues aux champs extrêmement basses fréquences mais ne l'exclut pas pour autant. En effet, une promotion de ces tumeurs est retrouvée dans certaines lignées particulièrement sensibles de souches de rat. L'OMS, quant à elle, présente trois études dont la conclusion globale est qu'il n'existe aucune preuve de l'action des champs extrêmement basses fréquences sur les tumeurs mammaires spontanées. Cependant, les effets sur des tumeurs induites chimiquement diffèrent en fonction des variations dans les protocoles expérimentaux. Enfin, l'OMS se penche également sur d'autres types de tumeurs. Il n'y aurait aucun effet des champs extrêmement basses fréquences sur les leucémies et les lymphomes selon des études murines. De même, aucun effet n'est constaté sur des lésions hépatiques précancéreuses, des tumeurs cutanées et cérébrales induites chimiquement et des leucémies et lymphomes induits chimiquement ou par radiations.

On peut noter qu'à ce jour, une seule étude a utilisé un modèle chimio-induit de leucémie lymphoblastique aiguë pro-B [Bernard *et al.*, 2008] sans pouvoir mettre en évidence un effet des champs magnétiques extrêmement basses fréquences sur ce modèle.

Concernant les études humaines, elles sont peu nombreuses et peu d'éléments étaient disponibles en 2004. Cependant, comme pour les études *in vitro*, rien n'indique que des effets puissent résulter d'exposition à des niveaux maximum de champ de 100 μ T [CSHPF, 2004].

La majorité des études ne montre aucune augmentation du risque de tumeurs de quelque sorte que ce soit. Cette conclusion est partagée par les auteurs du rapport à la DGS [CSHPF, 2004], l'OMS [WHO, 2007], le programme européen EMF-NET [EMF-NET, 2008] et le Scenihhr [SCENIHR, 2009].

Conclusion :

Ainsi, les études *in vivo* montrent que les champs magnétiques EBF ne sont pas capables d'induire des cancers ou d'accélérer la croissance de tumeurs greffées. Les études de co-cancérogenèse n'ont pas montré que les champs extrêmement basses fréquences étaient capables d'augmenter les effets de cancérogènes connus dans la majorité des modèles. Seul le modèle de tumeurs mammaires induites par le DMBA a donné des résultats contradictoires. Sur la base de ces résultats, le CIRC a estimé en 2002 que la preuve expérimentale de la cancérogénicité des champs magnétiques extrêmement basses fréquences était insuffisante (*inadequate evidence*). Aucun des rapports publiés depuis n'a estimé que les résultats obtenus après l'évaluation du CIRC ne la remettent en cause.

4.3.2.1.3 Études épidémiologiques sur les cancers de l'enfant

Expositions résidentielles

- Leucémie de l'enfant

Les études épidémiologiques se sont multipliées pour explorer l'hypothèse soulevée par Wertheimer et Leeper [Wertheimer et Leeper, 1979] d'une augmentation du risque de leucémie de l'enfant dans les habitations présentant des câblages électriques particuliers et fortement exposées aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences. Les méta-analyses d'Ahlbom [Ahlbom *et al.*, 2000] et de Greenland [Greenland *et al.*, 2000] ont synthétisé les études qui ont pu quantifier les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et leur rôle dans les leucémies de l'enfant. Les conclusions convergentes de ces deux méta-analyses en faveur d'une augmentation du risque ont été reprises dans la monographie du CIRC [IARC, 2002] qui a classé cet agent parmi les cancérogènes possibles. Depuis, aucun des rapports publiés n'a remis en question cette évaluation.

Ainsi, dans son rapport de janvier 2009 [SCENIHR, 2009], le Scenihhr considère que la littérature épidémiologique converge vers une possible augmentation du risque de leucémie chez les enfants exposés à des champs magnétiques résidentiels de plus de 0,3 à 0,4 μ T. Il ne retient aucun argument en faveur d'un rôle de ces expositions chez l'adulte ou dans d'autres cancers de l'enfant.

La littérature a peu évolué depuis le rapport du Scenihhr de 2007 [SCENIHR, 2007]. L'analyse conjointe d'Ahlbom [Ahlbom *et al.*, 2000] a cependant été étendue [Schüz *et al.*, 2007]. La nouvelle analyse a porté sur l'exposition nocturne et a obtenu des résultats quasiment identiques à ceux de l'analyse initiale basée sur l'exposition mesurée ou estimée sur 24 heures.

Une revue récente a analysé en détail huit études qui comportaient une mesure des champs électriques résidentiels [Kheifets *et al.*, 2009]. Cette revue a conclu à l'absence d'élément en faveur d'un effet de ces champs, ce qui conforte le jugement du CIRC de 2002 en classe 3 (preuves insuffisantes de cancérogénicité) pour les champs électriques extrêmement basses fréquences.

Rien ne permet donc de remettre en question, dans un sens ou dans un autre, les conclusions du CIRC sur l'association possible entre champs extrêmement basses fréquences et leucémie de l'enfant.

- Autres types de cancers chez l'enfant

Les cancers chez l'enfant autres que les leucémies sont plus limités mais ne semblent pas être associés aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences résidentiels. Là encore, en 2009, le Scenihhr reste sur les conclusions de la monographie du CIRC de 2002 qui restreint le classement 2B au seul lien avec les leucémies de l'enfant

Expositions non résidentielles

Une analyse conjointe de 2 études cas-témoins canadiennes a mis en évidence un lien entre les tumeurs cérébrales de l'enfant et l'exposition professionnelle de la mère aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences avant ou pendant la grossesse [Li *et al.*, 2009]. L'évaluation rétrospective des expositions professionnelles maternelles a reposé sur une matrice emploi/exposition. Le métier exposé le plus prévalent était celui de mécanicien de machine à coudre.

4.3.2.1.4 Études épidémiologiques sur les cancers chez l'adulte

Expositions résidentielles

Les données disponibles chez l'adulte concernent principalement les expositions professionnelles. Les quelques données disponibles sur les expositions résidentielles au moment de l'évaluation du CIRC n'évoquaient pas de lien avec les cancers de l'adulte en général, ou avec les leucémies et les cancers du sein en particulier [IARC, 2002]. Les études parues depuis sur différents cancers ne remettent pas en question ces conclusions [SCENIHR, 2009].

Expositions professionnelles

L'hypothèse d'un lien entre cancer du sein et champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, qui avait été évoquée par une étude chez les employés de compagnies d'électricité canadiennes, n'a pas été retenue lors de l'évaluation du CIRC en 2002 [IARC, 2002]. Le Scenihr, en 2009, a considéré qu'il n'y avait pas d'éléments suffisants en faveur d'un lien entre expositions professionnelles aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et les cancers de l'adulte. Deux méta-analyses ont récemment estimé à 1,14 (1,07 – 1,22) pour les tumeurs cérébrales et 1,16 (1,11 – 1,22) pour les leucémies les risques relatifs associés aux expositions professionnelles aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, en l'absence des sources de biais les plus évidentes [Kheifets et Oksuzyan, 2008]. Toutefois, de l'avis même des auteurs, le caractère causal de ces relations est assez peu vraisemblable : les associations sont faibles, les estimations les plus récentes sont plus basses que celles des études les plus anciennes alors que la qualité des enquêtes a augmenté et que les expositions n'ont pas baissé, il n'y a pas de relation dose-risque et les associations étaient du même ordre pour tous les types de leucémie dans les études les plus anciennes.

La majorité des travaux s'est concentrée sur les champs magnétiques. Toutefois, une revue récente a évalué les études comportant une estimation des expositions aux champs électriques [Kheifets *et al.*, 2009]. Elle n'a dégagé aucun élément en faveur d'un lien entre champs électriques d'origine professionnelle et cancer.

4.3.2.1.5 Conclusion

La conclusion du CIRC n'est pas remise en cause par les études publiées depuis 2002. Les éléments en faveur d'une association entre la leucémie de l'enfant et l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences restent valides. Les données actuelles sur les autres types de cancers de l'enfant et sur les cancers de l'adulte restent insuffisantes et ne sont pas en faveur d'une association avec ces champs électromagnétiques.

4.3.2.2 Autres troubles

Les autres troubles pouvant être provoqués par des champs extrêmement basses fréquences sont relativement bien documentés. En effet, plusieurs hypothèses existent concernant notamment des effets sur les systèmes cardiovasculaire et neuroendocrinien, la reproduction et le développement.

4.3.2.2.1 *Études in vitro*

Le Scenihhr déplore que, depuis le précédent rapport de 2007, peu d'études *in vitro* aient été publiées et conclut à l'absence de données suffisantes pour statuer sur l'existence d'effets des champs extrêmement basses fréquences. Cette conclusion est reprise par le groupe de travail EMF-NET [EMF-NET, 2008] et l'OMS [WHO, 2007].

Certaines études présentent cependant des résultats intéressants, bien qu'une validation soit indispensable pour pouvoir conclure. En effet, les auteurs du rapport à la DGS affirment qu'il n'existe aucune preuve de l'existence d'un effet des champs extrêmement basses fréquences en dessous de 100 μ T [CSHPF, 2004]. Comme vu précédemment pour les effets cancérogènes, ils attirent l'attention sur la synergie qui pourrait exister entre les champs extrêmement basses fréquences et des facteurs chimiques ou physiques dans l'induction d'une pathologie d'une part et l'influence du potentiel génétique d'autre part.

Système neuroendocrinien

En 2002, le CIRC présentait une seule étude *in vitro* montrant une influence des champs extrêmement basses fréquences sur le récepteur sérotoninergique 5-HT_{1B} [Massot *et al.*, 2000]. Ce récepteur est impliqué dans le rythme circadien en induisant la diminution de la concentration de mélatonine pendant la journée. Les tests ont été effectués sur des tissus de cerveau de rat et de cochon d'Inde et sur des cellules ovariennes de hamster transfectées avec la forme humaine du récepteur. Après une exposition à des champs magnétiques à 50 Hz (0,1 à 10 mT), les auteurs ont remarqué une diminution de la constante d'affinité du récepteur lorsque la réponse était saturée. L'action d'un agoniste sur le récepteur est ainsi inhibée et il n'y a pas de réponse. Le groupe de travail du CIRC met cependant en avant que l'on ignore dans quelle mesure ce résultat peut être transposé à un organisme entier.

L'OMS rapporte que relativement peu d'études *in vitro* ont été entreprises [WHO, 2007]. Elles ont majoritairement porté sur des glandes pinéales isolées pour étudier l'impact des champs extrêmement basses fréquences sur la production ou la libération de mélatonine. Les effets observés sont variables d'une étude à l'autre. Il semble que les champs magnétiques extrêmement basses fréquences puissent agir sur le rôle de la mélatonine dans des cellules de cancer du sein. Cependant, les cellules utilisées présentent fréquemment une dérive génotypique et phénotypique rendant la reproductibilité difficile.

Maladies neurodégénératives

Le Scenihhr [SCENIHR, 2009] présente une étude allant dans le sens d'une corrélation entre une exposition aux champs extrêmement basses fréquences et le développement de la maladie d'Alzheimer. Cette étude a montré une augmentation de la sécrétion du peptide β -amyloïde suite à l'exposition de cellules de neurogliome humain à un champ extrêmement basses fréquences (50 Hz et 3,4 mT). Ce peptide agit dans le développement de la maladie d'Alzheimer en formant des fibres puis des plaques amyloïdes.

Conclusion

Ainsi, les différents rapports étudiés concluent tous qu'il y a un manque important de données *in vitro* concernant les effets biologiques des champs extrêmement basses fréquences autres que ceux liés au cancer. En effet, peu d'études sont disponibles. De plus, celles-ci ne permettent pas une compréhension des effets des champs en relation avec l'induction d'une pathologie en général. De plus amples études seraient nécessaires pour valider les hypothèses soulevées par les études actuelles mais également pour préciser un éventuel mécanisme d'action cellulaire de ces champs.

4.3.2.2.2 Études *in vivo*

Système nerveux

Les effets rapportés des champs EBF sur le système nerveux sont légers, subtils et transitoires ([WHO, 2007] ; [SCENIHR, 2009]). Cependant, chez l'homme, des atteintes de la rétine sont rapportées par le CIRC [IARC, 2002] et plus tard par l'OMS [WHO, 2007]. Ce sont des magnéto-phosphènes dont les signes cliniques sont des éclairs blancs qui gênent la vision. De tels effets sont constatés seulement pour une exposition à des champs extrêmement basses fréquences supérieurs à 5 mT, ce qui n'est pas compatible avec les expositions communément rencontrées chez l'homme. Chez l'animal, les champs EBF peuvent influencer sur les capacités d'apprentissage et la mémoire spatiale des rongeurs [IARC, 2002]. L'OMS rapporte des effets subtils et transitoires sur le neurocomportement des animaux étudiés et présente un mécanisme possible d'action de ces champs. Il s'agirait d'une modulation des fonctions des systèmes neurotransmetteurs opioïde et cholinergique du cerveau chez le rongeur. Toutefois, les structures cérébrales potentiellement sensibles aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences restent inconnues [CSHPF, 2004].

Les symptômes dépressifs et le suicide ne sont pas évaluables chez l'animal. C'est donc chez l'homme que des études ont été réalisées pour évaluer l'influence des champs extrêmement basses fréquences sur ces troubles. Tout d'abord, l'OMS rapporte que les données disponibles sont contradictoires et non concluantes et demande de plus amples études pour apporter les preuves nécessaires à une conclusion. En comparaison avec l'induction de magnéto-phosphènes qui est bien caractérisée, les effets sur la cognition humaine sont moins nets. De plus, les mécanismes de ces effets restent inconnus [WHO, 2007]. En outre, les résultats concernant les fonctions cognitives sont non cohérents, transitoires, non reproductibles et de faible amplitude [CSHPF, 2004].

Ainsi, les données disponibles concernant les effets des champs extrêmement basses fréquences sur le système nerveux ne sont pas suffisantes pour conclure en faveur de tels effets.

Maladies neurodégénératives

Depuis quelques années, et en rapport avec les études épidémiologiques, des modèles animaux ont été utilisés essentiellement en rapport avec deux pathologies particulières, la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique (SLA).

Le Scenihhr mentionne une seule étude animale qui a utilisé un modèle de souris SOD-1 pour étudier l'influence de champs magnétiques extrêmement basses fréquences (50 Hz, 100 et 1 000 μ T). Dans cette étude, l'exposition n'a pas modifié le développement de la maladie [SCENIHR, 2009].

Reproduction et développement

La plupart des rapports étudiés se penche sur la problématique des effets des champs extrêmement basses fréquences sur la reproduction et le développement. Globalement, il n'existe pas de données en faveur d'un effet de ces champs sur le développement ou la reproduction.

L'OMS [WHO, 2007] rapporte qu'un grand nombre d'études a été mené chez plusieurs espèces de mammifères pour évaluer l'effet des champs extrêmement basses fréquences sur le développement. Ces études sont, pour la majorité, de bonne qualité méthodologique (grands groupes et sur plusieurs générations). Aucun effet indésirable sur le développement n'a été montré. De même, une exposition inférieure à 20 mT n'entraîne pas de malformations « externes, squelettiques ou viscérales grossières ».

Lorsque des effets des champs extrêmement basses fréquences sont mis en évidence sur le développement, il s'agit de modifications mineures du squelette chez le rat et la souris. Ces variations ne sont pas considérées comme significatives biologiquement, car elles sont classiques dans les études de tératologie. De même, si des effets sont observés chez l'homme, il s'agit d'anomalies mineures du développement observées suite à une exposition relativement longue et avec un champ de forte intensité [IARC, 2002]. En revanche, plusieurs études ont donné des résultats en faveur d'un effet des champs magnétiques extrêmement basses fréquences de l'ordre du μT sur les premiers stades du développement de modèles animaux non-mammifères (insectes, poissons et embryons de poulet). Ces résultats possèdent un poids inférieur dans l'évaluation de la toxicité de ces champs sur le développement par rapport à ceux obtenus chez des mammifères.

Concernant la fonction de reproduction chez l'animal, aucun effet n'est généralement induit par une exposition aux champs extrêmement basses fréquences [IARC, 2002]. En 2007, l'OMS déclare qu'un faible nombre d'études a été publié, ce qui ne permet pas de proposer des conclusions [WHO, 2007].

Le programme européen EMF-NET déclare également que les preuves ne sont pas suffisantes pour conclure, en distinguant les champs magnétiques et électriques extrêmement basses fréquences. Dans le cas des champs électriques, aucun effet n'est rapporté. En revanche, en ce qui concerne les champs magnétiques, ce rapport réévalue les conclusions de la précédente publication de 2004. En effet, les preuves sont limitées pour les effets sur le développement mais elles sont insuffisantes pour les effets sur la reproduction [EMF-NET, 2008].

Système neuroendocrinien

Chez l'animal, quelques études ont montré un lien entre les champs extrêmement basses fréquences et la modification de la concentration de mélatonine. Cette hormone est impliquée dans le rythme circadien et est présente dans l'organisme en grande concentration la nuit et en faible concentration le jour. Une réduction de la concentration de mélatonine (pinéale et/ou sérique) a été observée chez le rongeur notamment, suite à une exposition aux champs extrêmement basses fréquences [IARC, 2002]. De même, une suppression de sécrétion de mélatonine est rapportée dans une étude, mais ces effets sont à prendre avec précaution puisque les comparaisons entre les animaux exposés et les témoins historiques sont inappropriées [WHO, 2007]. Des effets subtils sur la mélatonine et les hormones sexuelles sont mis en évidence sur la vache, le rat et la souris dans le rapport EMF-NET consacré aux études de laboratoires [EMF-NET, 2008]. Ces effets semblent cependant assez légers et sensibles aux variations des conditions expérimentales. De plus, les études conduites chez des animaux dont l'activité reproductive est déterminée par les saisons sont principalement négatives quant à la mise en évidence d'effets des champs extrêmement basses fréquences sur la reproduction dépendante de la mélatonine [WHO, 2007].

Chez des primates non-humains, une exposition chronique à des champs extrêmement basses fréquences n'a pas permis de mettre en évidence des effets significatifs sur la concentration de

mélatonine [IARC, 2002]. L'OMS a également mis en évidence une absence d'effet sur la capacité reproductive déterminée par la mélatonine chez des primates.

Chez l'homme, aucun effet n'est mis en évidence sur la production et la libération de mélatonine après une exposition nocturne aux champs extrêmement basses fréquences. Une légère diminution de cette concentration est rapportée mais elle est vraisemblablement due à des facteurs environnementaux [IARC, 2002]. Cependant, un lien entre ces champs et la modification de la concentration de mélatonine chez l'homme ne peut être exclu, en raison de la forte variabilité qui existe entre les individus [CSHPF, 2004]. Pour préciser la conclusion générale, l'OMS présente une étude où les facteurs de confusion ont été supprimés. Les résultats sont concordants avec les autres rapports. Aucun effet n'est observé sur la concentration nocturne de mélatonine chez l'homme [WHO, 2007]. De même, le programme européen EMF-NET expose, dans l'actualisation de son rapport en 2008, que des preuves existent suggérant une absence d'effet des champs magnétiques extrêmement basses fréquences chez l'homme (volontaires dans des conditions précises et contrôlées) [EMF-NET, 2008].

La totalité des rapports présentés ici n'est pas en faveur d'une association entre les champs extrêmement basses fréquences et la modification de la concentration de mélatonine. L'OMS conclut à l'insuffisance des éléments de preuve sur le système endocrinien humain, même si la preuve est limitée chez l'animal ([WHO, 2007] ; [EMF-NET, 2008]). Cette conclusion est également celle du Scenihp [SCENIHR, 2009].

Systèmes immunitaire et hématologique

Système immunitaire :

Chez l'animal, les effets rapportés sont le plus souvent une diminution du nombre de lymphocytes, une diminution de la prolifération des cellules T ou une incidence sur la sécrétion de cytokines. L'OMS rapporte plusieurs études animales dans lesquelles une diminution de l'activité des cellules NK est observée. Cependant, elle n'est retrouvée que chez la souris femelle alors que les études étaient effectuées sur des souris et des rats des deux sexes [WHO, 2007]. Des variations leucocytaires après exposition à un champ compris entre 2 μ T et 30 mT sont également rapportées par l'OMS dans la monographie de 2007, même si un grand nombre d'études ne parvient pas à mettre en évidence un effet des champs extrêmement basses fréquences [EMF-NET, 2008]. Chez l'homme, seul un faible nombre d'études est disponible et les résultats sont généralement une variation de populations cellulaires. Une légère diminution du nombre de leucocytes circulants est constatée mais elle n'est pas prise en compte puisqu'elle s'apparente à la diminution engendrée par un exercice sportif [CSHPF, 2004]. L'OMS fait également état d'une absence d'effet des champs extrêmement basses fréquences mais met tout de même en avant une étude où une modification des cellules NK (augmentation et diminution du nombre) et une modification de la numération leucocytaire (diminution nombre) sont constatées [WHO, 2007]. De plus, le CIRC soulève le problème majeur de ces études : les échantillons sont trop petits pour permettre de conclure quant à l'influence des champs extrêmement basses fréquences sur les systèmes immunitaire et hématologique [IARC, 2002]. Le programme EMF-NET déclare que les données disponibles ne sont pas homogènes (avis partagé avec l'OMS en 2007) impliquant que les preuves sont insuffisantes pour conclure sur la présence ou non d'un effet des champs extrêmement basses fréquences sur le système immunitaire [EMF-NET, 2008].

Système hématologique :

Aucun effet n'est mis en évidence sur la formation du sang chez les animaux étudiés et leur portée [IARC, 2002]. Chez l'homme, aucun effet hématologique constant n'est mis en évidence après une exposition aiguë [WHO, 2007]. De plus, l'OMS souligne l'interprétation difficile des études immunologiques dans la mesure où elles comportent un faible nombre de sujets et présentent de

grandes variations dans l'exposition et l'environnement. Une autre limitation à l'interprétation de ces études est le grand nombre de paramètres biologiques suivis. Ainsi, elle conclut que les éléments sont insuffisants pour statuer sur l'existence d'effets hématologiques [WHO, 2007]. Le Scenihhr [SCENIHR, 2009] et le programme EMF-NET [EMF-NET, 2008] sont en accord avec cette conclusion.

Système cardiovasculaire

Si des effets des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences sur le système cardiovasculaire sont mis en évidence, ils sont mineurs et les résultats des études ne sont pas homogènes à des niveaux d'exposition communs. De plus, des effets des champs sur le système cardiovasculaire ont « peu de chances de se produire aux niveaux d'exposition communément rencontrés ». Les éléments ne sont pas en faveur d'une association des champs extrêmement basses fréquences avec des pathologies cardiovasculaires [WHO, 2007]. Le rapport EMF-NET sur les études de laboratoire déclare qu'il existe certaines preuves suggérant des effets sur la variabilité de la fréquence cardiaque chez l'homme pendant et après l'exposition à des champs magnétiques relativement élevés (plusieurs dizaines de μT). Cependant, les preuves d'une association entre champs extrêmement basses fréquences et troubles cardiovasculaires restent insuffisantes [EMF-NET, 2008]. Enfin, le Scenihhr maintient sa conclusion de 2007 dans son rapport de 2009 : une association est peu probable à la lumière des études parues depuis la dernière édition. Dans l'ensemble, les éléments dont on dispose ne sont pas en faveur d'une association entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et une maladie cardio-vasculaire [WHO, 2007].

Conclusion

Ainsi, les éléments apportés par les études *in vivo* sont insuffisants pour conclure quant aux effets autres que cancérogènes des champs magnétiques extrêmement basses fréquences. Cependant, l'hypothèse de l'implication de ces champs dans les pathologies neurodégénératives (Alzheimer et SLA) est à prendre en compte. Le Scenihhr déclare que des effets sur le système nerveux sont possibles avec des champs de 0,1 à 1 mT mais que ces données ne permettent pas de tirer une conclusion définitive sur les effets sanitaires chez l'homme [SCENIHR, 2009]. En ce qui concerne les effets rapportés sur le système neuroendocrinien, bien que majoritairement négatifs, ils doivent être validés par de plus amples études pour pouvoir conclure. Le système nerveux semble être suggéré comme une cible préférentielle des champs extrêmement basses fréquences. De même que pour les autres effets, il faut préciser les atteintes que peuvent entraîner ces champs par d'autres études. Enfin, il est majoritairement admis que des effets cardiovasculaires dangereux induits par les champs extrêmement basses fréquences sont très peu probables.

4.3.2.2.3 Études épidémiologiques

L'hypothèse d'un rôle des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences a été soulevée dans plusieurs pathologies non cancéreuses, mais elle reste globalement moins bien documentée. Ainsi, au-delà des effets cancérogènes potentiellement induits par les champs extrêmement basses fréquences, le CIRC [IARC, 2002] s'est penché sur les études épidémiologiques s'intéressant aux autres troubles possibles.

De nombreux biais et problèmes de méthodologie viennent perturber les conclusions de ces études [CSHPF, 2004]. Ainsi, l'interprétation des résultats est rendue difficile par le faible nombre de sujets impliqués. C'est également le cas des études sur les systèmes immunitaire et hématologique, mais ces études possèdent également un autre facteur empêchant leur interprétation : elles sont trop peu nombreuses. Le rapport remis à la DGS [CSHPF, 2004] souligne également le faible nombre d'études épidémiologiques disponibles, ce qui ne permet pas de

formuler des conclusions sur les effets chez l'homme des champs extrêmement basses fréquences. Ce rapport ne remet pas en cause les conclusions du CIRC mais, au contraire, cite les études rapportées dans la monographie.

Reproduction et développement

Les études épidémiologiques portant sur les effets des champs magnétiques extrêmement basses fréquences sur la reproduction n'ont pas montré d'association avec une exposition parentale [WHO, 2007]. Cependant, dans le même rapport, une étude rapporte une augmentation du risque de fausse-couche chez les femmes exposées aux champs EBF, mais les éléments ne sont pas suffisants pour conclure. Le rôle des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences a été soupçonné, mais il n'y a pas à l'heure actuelle de données solides et répliquées permettant d'impliquer ces champs dans le risque d'infertilité, de fausses couches ou de malformation congénitale.

Système cardiovasculaire

Plusieurs études épidémiologiques concernent les pathologies cardiovasculaires – la mortalité cardiovasculaire dans la majorité des cas, la mortalité par infarctus du myocarde plus rarement, l'infarctus du myocarde dans un cas – et leur lien avec les champs extrêmement basses fréquences d'origine professionnelle. Une étude de cohorte de grande taille avait mis en évidence une association avec les décès par arythmie ou infarctus du myocarde [Savitz *et al.*, 1999], mais cette association n'a pas été confirmée par les autres travaux cités dans une revue récente [McNamee *et al.*, 2009]. Dans son rapport de 2007, le Scenihhr disposait d'arguments suffisants pour écarter un lien entre les champs électromagnétiques et les pathologies cardiovasculaires et ce point de vue n'a pas été remis en question depuis [SCENIHR, 2009].

Système neuroendocrinien

Dans sa monographie de 2002, le CIRC a présenté des résultats mitigés sur la concentration de mélatonine mais il est difficile de distinguer quelle part de ces variations est attribuable aux champs extrêmement basses fréquences et quelle part peut être due à des facteurs environnementaux [IARC, 2002]. Quelques années plus tard, l'OMS a conclu que le système endocrinien n'était pas affecté par une exposition à ces champs [WHO, 2007].

Maladies neurodégénératives

L'influence des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences a été évoquée dans plusieurs pathologies neurodégénératives incluant la maladie de Parkinson, la sclérose latérale amyotrophique et les démences. En 2002, lors de la parution de la monographie du CIRC, les éléments en faveur d'une association entre ces pathologies et les champs extrêmement basses fréquences étaient insuffisants. Dans deux études publiées depuis, l'une chez les employés d'une compagnie de chemin de fer suisse et l'autre chez les employés d'une compagnie d'électricité de Grande-Bretagne, la mortalité par maladie de Parkinson n'était pas augmentée [EMF-NET, 2009]. Toutefois, la mortalité n'est pas un bon marqueur de la maladie de Parkinson et les données disponibles restent très insuffisantes. Les données sur la maladie d'Alzheimer sont un peu plus nombreuses. Une méta-analyse de 14 études, 9 études cas-témoins et 5 études de cohorte, a mis en évidence une association significative entre expositions professionnelles aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences et la maladie d'Alzheimer avec des *odds ratios* estimés à 2,0 (1,4 - 3,0) pour les études cas-témoins et 1,6 (1,2 - 2,3) pour les études de cohorte [Garcia *et al.*, 2008]. Malgré tout, les études prises en compte dans cette méta-analyse

sont fortement hétérogènes, tant sur le type d'exposition considéré, que sur le degré de précision et de fiabilité du diagnostic et l'interprétation reste donc limitée. Dans son avis de 2009, le Scenihhr recommande des recherches supplémentaires sur cette association [SCENIHR, 2009].

Conclusion :

Le Scenihhr, en 2009, conclut que les études épidémiologiques récentes appuient l'hypothèse que la maladie d'Alzheimer pourrait être liée à une exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Toutefois, les données sur cette association restent peu convaincantes. Globalement il existe actuellement peu d'éléments en faveur d'une relation entre les champs magnétiques extrêmement basses fréquences et les pathologies autres que les cancers.

4.3.2.3 Hypersensibilité électromagnétique

4.3.2.3.1 Définition et symptômes

L'hypersensibilité électromagnétique (appelée aussi EHS) est « caractérisée par divers symptômes que les individus concernés attribuent à l'exposition aux champs électromagnétiques » [OMS, 2005]. Les personnes EHS attribuent leurs symptômes aux champs électromagnétiques en général, avec cependant une dominance des champs radiofréquences. Les symptômes présentés par les individus EHS peuvent être très variés mais les plus rapportés sont « des symptômes dermatologiques (rougeurs, picotements et sensations de brûlure), des symptômes neurasthéniques et végétatifs (fatigue, lassitude, difficultés de concentration, étourdissements, nausées, palpitations cardiaques et troubles digestifs) » selon l'OMS. Des sujets se sont également plaints de maux de tête et de troubles locomoteurs, cardiorespiratoires, auditifs, allergiques ou vasomoteurs parfois sévères. De plus, les travaux réalisés jusqu'à présent n'ont pas réussi à dégager un profil symptomatologique spécifique de l'EHS ([Osterberg *et al.*, 2007] ; [Eltiti *et al.*, 2007]). Elle n'est pas associée à des troubles psychiatriques de la personnalité, mais les patients atteints d'EHS souffrent plus souvent d'anxiété vis-à-vis de l'environnement et de la vie professionnelle et de souffrance psychique au travail que les sujets présentant les mêmes symptômes mais ne les attribuant pas aux champs électromagnétiques ([Osterberg *et al.*, 2007] ; [Rubin *et al.*, 2005]).

Étant donné que les symptômes présentés par les personnes se disant EHS sont subjectifs, il n'existe pas d'approche expérimentale, cellulaire ou animale, pour l'étude de l'EHS. C'est pourquoi, les seules études disponibles ont été faites chez l'homme.

4.3.2.3.2 Prévalence

La prévalence des individus EHS varie entre 1,5 % et 5 % selon les études présentées par le Scenihhr [SCENIHR, 2009]. En outre, l'OMS rapporte qu'une enquête réalisée dans des centres de médecine du travail a évalué à quelques sujets par million la prévalence de l'EHS dans la population. Sur la totalité des cas rapportés, environ 10 % sont graves [OMS, 2005].

4.3.2.3.3 Relation entre EHS et exposition aux champs extrêmement basses fréquences

Malgré le grand nombre d'études sur le sujet, aucune étude de provocation n'est parvenue à démontrer l'existence de l'hypersensibilité électromagnétique liée à l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences [SCENIHR, 2007]. Un rapport plus récent, publié en 2009 [SCENIHR, 2009], présente la même conclusion que l'édition précédente de 2007. Cette vue est partagée par l'OMS [OMS, 2005], qui précise que des études de bonne qualité et en double

aveugle n'ont pas mis en évidence de relation entre une exposition aux champs extrêmement basses fréquences et l'apparition de symptômes chez les patients dits EHS.

Aujourd'hui, les études sont majoritairement tournées vers la caractérisation et les facteurs pouvant influencer l'état d'hypersensibilité électromagnétique.

Selon une méta-analyse récente, la littérature ne permet pas de relier l'EHS à une exposition à des champs électromagnétiques en général [Rubin *et al.*, 2005]. Cela confirme bien qu'aucune relation entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et l'hypersensibilité électromagnétique n'a été mise en évidence. Cette pathologie a d'ailleurs été rebaptisée intolérance environnementale idiopathique lors d'un groupe de travail de l'OMS sur l'hypersensibilité en 2007.

En conclusion, l'EHS est un syndrome hétérogène que les données actuelles ne permettent pas de relier spécifiquement aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

4.3.3 Conclusion sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Les différentes évaluations internationales (organisations, groupes d'experts ou groupes de recherche) se maintiennent de façon concordante sur la position du CIRC de 2002. Étant donné le nombre important de recherches et de résultats déjà publiés, il est peu probable que de nouvelles études puissent changer le cadre global. On peut ainsi prévoir que ni le CIRC, ni l'OMS ne devraient réviser leurs monographies, au moins pendant une dizaine d'années. Ainsi, les recommandations de l'Inirp, quand elles seront approuvées, devraient rester longtemps en place.

En ce qui concerne de possibles effets à long terme, il reste possible que l'association observée entre exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémie de l'enfant soit causale au vu de la littérature épidémiologique mais cette hypothèse n'est soutenue ni par des études sur animaux ni par des études *in vitro* sur des systèmes cellulaires.

La littérature et les différents avis publiés ne remettent pas en cause l'évaluation de 2002 du CIRC [IARC, 2002] : il existe des preuves limitées en faveur de la cancérogénicité des champs magnétiques extrêmement basses fréquences chez l'homme, dans le cas des leucémies de l'enfant. Les preuves de la cancérogénicité pour l'homme des champs électriques extrêmement basses fréquences sont insuffisantes. Chez l'animal, les preuves de la cancérogénicité des champs magnétiques extrêmement basses fréquences sont insuffisantes²⁸.

La conclusion publiée en 2002 par le CIRC, classant les champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (« peut-être cancérogène pour l'homme ») est donc toujours d'actualité.

²⁸ "There is limited evidence in humans for the carcinogenicity of ELF magnetic fields in relation to childhood leukaemia. There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of static fields or magnetic fields and ELF electric fields. There is inadequate evidence in experimental animals for the carcinogenicity of ELF magnetic fields".

5 Conclusion et recommandations

5.1 Conclusion

Des études portant sur la mesure de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences publiées ces dernières années ou encore en cours, il ressort que la connaissance de cette exposition s'est grandement améliorée. La nature des sources responsables de ces émissions est bien connue. Les moyens disponibles permettent aujourd'hui notamment de simuler l'exposition au champ créé par les lignes de transport d'électricité. Les outils de mesure du champ émis par des ouvrages de transport d'électricité ou des appareils électroménagers sont fiables. Par ailleurs, des appareils spécifiques permettent de quantifier l'exposition individuelle des personnes aux différentes sources de champ dans leurs activités quotidiennes. Ces outils doivent permettre de mieux évaluer l'exposition des personnes, notamment pour améliorer les études épidémiologiques, qu'elles s'intéressent à la population générale ou à des populations professionnelles spécifiques.

Certaines études épidémiologiques rapportent une augmentation significative du risque de leucémie chez l'enfant à partir d'une exposition résidentielle moyennée de 0,2 à 0,4 μT . Cependant, la manque de vérification de ces résultats par les études expérimentales, notamment celles conduites chez l'animal, et l'absence de mécanisme d'action plausible, ont conduit l'Inirp, pour la définition de valeurs limites d'exposition, à s'en tenir aux valeurs basées sur les effets aigus, liés à l'induction de courants électriques dans le corps : « Dans l'ensemble, contrairement à la preuve épidémiologique d'une association entre la leucémie infantile et l'exposition prolongée aux champs magnétiques aux fréquences du réseau électrique, les données de cancer chez les animaux, en particulier celles des études de grande ampleur sur toute la durée de vie, sont quasi-unaniment négatives. Les données provenant d'études cellulaires sont généralement en faveur de cette opinion, quoique plus équivoques. [...] Le point de vue de l'Inirp est que les preuves scientifiques actuelles appuyant l'hypothèse que les champs magnétiques EBF soient associés de manière causale à la leucémie infantile sont trop faibles pour constituer la base de l'établissement des lignes directrices d'exposition»²⁹ [ICNIRP, 2009].

À partir de ces données épidémiologiques, le CIRC a classé le champ magnétique de fréquences 50 - 60 Hz comme cancérogène possible (catégorie 2B), en exposition résidentielle chez l'enfant, au-delà d'une exposition moyenne sur 24 heures de 0,4 μT [IARC, 2002].

Cette classification repose donc sur des données épidémiologiques seules et l'absence de mécanisme biochimique identifié, notamment, justifie que cet agent physique ne soit pas classé en catégorie supérieure.

Compte tenu des incertitudes méthodologiques, de l'absence, à ce jour, de mécanisme d'action plausible, de la négativité des principales études chez l'animal, la valeur de 0,4 μT ne peut pas être avancée comme un niveau de risque effectif, au-delà duquel la probabilité de voir survenir des effets sanitaires dommageables serait démontrée. C'est également la position de l'OMS [OMS,

²⁹ "Overall, in contrast to the epidemiological evidence of an association between childhood leukemia and prolonged exposure to power frequency magnetic fields, the animal cancer data, particularly those from large-scale lifetime studies, are almost universally negative. The data from cellular studies are generally supportive of this view, though more equivocal. [...] It is the view of ICNIRP that the currently existing scientific evidence that ELF magnetic fields is causally associated with childhood leukemia is too weak to form the basis for exposure guidelines"

2007, aide-mémoire n°322] qui considère que les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme sont insuffisantes pour justifier une modification des valeurs limites d'exposition.

Les différentes évaluations internationales (organisations, groupes d'experts ou groupes de recherche) se maintiennent de façon concordante sur la position du CIRC de 2002. Étant donné le nombre important de recherches et de résultats déjà publiés, il est peu probable que de nouvelles études puissent changer le cadre global. On peut ainsi prévoir que ni le CIRC, ni l'OMS ne devraient réviser leurs monographies, au moins pendant une dizaine d'années. Ainsi, les recommandations de l'Icnirp, quand elles seront approuvées, devraient rester longtemps en place.

En ce qui concerne de possibles effets à long terme, il reste possible que l'association observée entre exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et leucémie de l'enfant soit causale, au vu de la littérature épidémiologique, mais cette hypothèse n'est soutenue ni par des études sur animaux ni par des études *in vitro* sur des systèmes cellulaires.

La littérature et les différents avis publiés ne remettent pas en cause l'évaluation de 2002 du CIRC [IARC, 2002] : il existe des preuves limitées en faveur de la cancérogénicité des champs magnétiques extrêmement basses fréquences chez l'homme, dans le cas des leucémies de l'enfant. Les preuves de la cancérogénicité pour l'homme des champs électriques extrêmement basses fréquences sont insuffisantes. Chez l'animal, les preuves de la cancérogénicité des champs magnétiques extrêmement basses fréquences sont insuffisantes³⁰.

La conclusion publiée en 2002 par le CIRC, classant les champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (« peut-être cancérogène pour l'homme ») est donc toujours d'actualité.

5.2 Recommandations

5.2.1 Caractérisation de l'exposition

Pour réaliser des évaluations de l'exposition :

- il est recommandé de prendre des temps de mesure supérieurs à 24 h, idéalement sur une période d'une semaine. Il est recommandé aussi de répéter les mesures en différentes saisons de l'année ;
- la méthodologie de la mesure de l'exposition dans les lieux de vie de la population étudiée doit être complétée par des mesures directes de l'exposition individuelle réelle, par des enregistreurs individuels portables ;
- la disponibilité d'un appareil miniature et peu coûteux, qui puisse être fabriqué en série, serait un moyen de cartographier précisément de nombreux lieux (dont des lieux fixes en les équipant de capteurs solaires) ;
- un appareil de référence donnant suffisamment d'informations, en particulier spectrales, permettrait de réduire une partie des aléas potentiellement liés aux études effectuées, en standardisant partiellement les méthodologies de mesures ;
- effectuer des mesures en population générale des déterminants de l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (lignes haute tension, appareils

³⁰ "There is limited evidence in humans for the carcinogenicity of ELF magnetic fields in relation to childhood leukaemia. There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of static fields or magnetic fields and ELF electric fields. There is inadequate evidence in experimental animals for the carcinogenicity of ELF magnetic fields".

électrodomestiques, transport, etc.). Réaliser une étude complémentaire des études Experts et Géocap ;

- caractériser l'exposition de certains équipements sources de champs, non encore étudiés : voiture électrique, etc.

5.2.2 Études et recherches sur les effets biologiques et sanitaires des extrêmement basses fréquences

Épidémiologie

- Réaliser des études épidémiologiques ciblées pour tirer parti de conditions d'expositions particulières : situations d'expositions importantes, milieu professionnel, etc. ;
- privilégier les études qui prennent bien en compte la caractérisation de l'exposition ;
- dans certains cas (nouvelles méthodologies, nouvelles recherches de pathologies associées), il peut être avantageux de réaliser des études de faisabilité avant d'engager des études épidémiologiques de grande ampleur ;
- prendre en compte des co-expositions, des expositions multifactorielles ;
- concernant les pathologies autres que les cancers, l'information disponible est souvent limitée, même pour la maladie d'Alzheimer. Il serait nécessaire que les travaux se poursuivent, de même pour la sclérose latérale amyotrophique (SLA) ;
- recommander d'obtenir de l'information, dans les études épidémiologiques, sur les adresses des enfants à leur naissance. Pour le moment, les données sur les lieux de résidence à la naissance ne peuvent pas être extraites de l'acte de naissance sans autorisation du tribunal d'instance de la mairie du lieu de naissance. Cela empêche de répliquer par exemple l'étude de Draper sur la distance aux lignes de l'habitation pendant la grossesse ;
- réaliser des études épidémiologiques dans le contexte d'expositions professionnelles, dont les données pourraient être utiles pour la population générale ;
- actualiser les analyses groupées existantes sur la leucémie infantile et les tumeurs cérébrales à l'aide des nouvelles données disponibles.

Effets biologiques

- Il semble important de mener des expérimentations animales avec des expositions *in utero* ou du moins précoces dans la vie, prolongées ou répétées dans le temps, autres que les études de tératologie et développement. Les paramètres à étudier devraient être en lien avec le cancer (cancérogenèse, génotoxicité et cytogénétique, etc.), ce qui semble pertinent pour la leucémie lymphoblastique aiguë ;
- il est également important de tester les interactions entre les champs extrêmement basses fréquences et des agents dont la toxicité est établie (agents génotoxiques notamment) en utilisant des protocoles de toxicologie standardisés et une puissance statistique suffisante ;
- réaliser des études visant à vérifier l'existence d'effets synergiques et à déterminer les seuils pour l'apparition de tels effets. Développer des études qui permettraient de comprendre les éventuels mécanismes d'effets co-cancérogènes ;
- mettre au point des modèles murins transgéniques de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs extrêmement basses fréquences ;
- étudier de manière approfondie les mécanismes des paires de radicaux dans les cellules immunitaires qui génèrent des espèces radicalaires de l'oxygène, dans le cadre de leur fonction phénotypique ;

- globalement, développer des études permettant de caractériser expérimentalement une relation causale entre les champs magnétiques extrêmement basses fréquences et les leucémies de l'enfant ;
- améliorer les protocoles dans les études biologiques et la caractérisation de l'exposition ;
- encourager l'utilisation des modèles animaux de leucémie lymphoblastique aiguë ;
- étudier les conséquences de l'exposition à un champ magnétique extrêmement basses fréquences sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal.

5.2.3 Autres recommandations

- encourager les laboratoires d'essais et de métrologie en électromagnétisme à obtenir une accréditation de type COFRAC pour des mesures de champ magnétique extrêmement basses fréquences, afin de développer la traçabilité et l'indépendance de l'offre de mesures ;
- encourager les sociétés d'exploitation à disposer de données consultables de l'exposition aux champs électromagnétiques des lignes haute tension de transport de l'électricité ;
- pour l'exposition en milieu professionnel, il est recommandé que les fabricants fassent des efforts de réduction de l'intensité du champ magnétique émis par des équipements utilisés en milieu professionnel ;
- mieux informer les industriels, qui doivent prendre en compte la future directive travailleurs, et s'assurer de la caractérisation et de la maîtrise des expositions de leurs collaborateurs ; fournir une aide aux entreprises pour la mise en place de la directive (information, outils d'évaluation, etc.) ;
- identifier les situations d'expositions majeures et mineures, notamment dans les petites et moyennes entreprises (coiffeurs, etc.), caractériser, classer les différentes expositions en fonction des sources ou des activités, pour faciliter le contrôle des expositions et du risque éventuellement associé ;
- organiser une veille spécifique sur la question de l'exposition des professionnels aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ;
- établir un protocole de mesures des champs extrêmement basses fréquences émis par les principaux émetteurs (transport d'électricité) ;
- favoriser l'accès des citoyens français aux documents internationaux les plus importants. Créer un site à caractère institutionnel de vulgarisation au sujets des champs extrêmement basses fréquences et proposer une cartographie de ces champs couplée à la localisation des lignes haute tension ;
- favoriser la communication institutionnelle sur le sujet.

6 Bibliographie

- AGNIR (2001). ELF electromagnetic fields and the risk of cancer. Chilton, National Radiological Protection Board. Documents of the NRPB:2(1).
- Ahlbom A., Day N., Feychting M. et al. 2000. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*;83(5):692-8.
- BAFU (2010). Niederfrequente Magnetfelder und Krebs. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich:118p.
- Bernard N., Alberdi A.J., Tanguy M.L. et al. (2008). Assessing the potential leukemogenic effects of 50 Hz magnetic fields and their harmonics using an animal leukemia model. *J Radiat Res. (Tokyo)*;49(6):565-77.
- Bernhardt J.H. (1986). Assessment of experimentally observed bioeffects in view of their clinical relevance and the exposure at work places. Symposium in Neuherberg, May 13-15, 1985. *Bga-Schriften*;3:157-168.
- Blackmore R.P. (1975). Magnetotactic bacteria. *Science* ;190:377-379.
- Blatin D., Bénetière J-J. (1998). Influence sur les élevages des champs électromagnétiques induits par les lignes électriques à haute tension. Rapport du ministère de l'agriculture et de la pêche, Conseil général du génie rural, des eaux et des forêts, Inspection générale de l'agriculture.
- Borjanovic S.S., Jankovic S.M., Pejovic Z. (2005). ECG changes in humans exposed to 50 Hz magnetic fields. *Journal of Occupational Health*;47(5).
- Brocklehurst B., McLauchlan K.A. (1996). Free radical mechanism for the effects of environmental electromagnetic fields on biological systems. *Int J Radiat Biol*;69:3-24.
- Cabanes J., Gary C. (1981). La perception directe du champ électrique. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à haute tension (CIGRE). Symposium 22-81:1-6.
- CCE (1999). Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). *JOCE* 1999;L199 (30 juillet 1999):59-70.
- Chung-Yi L., Gabor M., Fung-Chang S. et al. (2007). Survey of residential extremely-low-frequency magnetic field exposure among children in Taiwan. *Environment international*;33(2):233-238.
- Clinard F., Deschamps F., Milan C. et al. (2004). Évaluation de l'exposition aux champs magnétiques dans les habitations situées à proximité des lignes de transport de l'électricité en France. *Environnement, Risques et Santé*;3:111-118.
- CSHPP (2005). Avis relatif aux champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence. Séance du 3 mars 2005:2p.
- CSHPP (2004). Aurengo, A., Clavel, J., de Seze R., et al. Champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence et santé. *DGS*:61p.
- Decat G., Peeters E., Smolders R., Bossuyt M. (2003). Tijdsreeks en GIS-model om de blootstelling van de bevolking aan het 50 Hz magnetisch veld gegenereerd door bovengrondse hoogspanningslijnen in Vlaanderen in kaart brengen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2003/05, Vito, Belgique.
- Dockerty J.D., Elwood J.M., Skegg D.C., Herbison G.P. (1998). Electromagnetic field exposures and childhood cancers in New Zealand. *Cancer Causes Control*;9:299-309.
- Eltiti S., Wallace D., Zougkou K. et al. (2007). Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire. *Bioelectromagnetics*;28:137-51.

- EMF-NET (2004). Deliverable 1: Report on laboratory studies on ELF fields. European Commission 6th Framework Programme:17p.
- EMF-NET (2008). Deliverable 1bis & 1ter: Report on laboratory studies on ELF fields. European Commission 6th Framework Programme:48p.
- EMF-NET (2006). Deliverable D15_b: Report on new epidemiological studies on ELF, intermediate frequencies, RF and very high frequencies (update). European Commission 6th Framework Programme:11p.
- EMF-NET (2009). Deliverable D15_c: Report on new epidemiological studies on static fields, ELF, intermediate frequencies, and RF. European Commission 6th Framework Programme:15p.
- ENERTECH Consultants (2007). EMCALC 2000 User Manual. <http://www.enertech.net/emfw/download/download.html>
- Erdal N., Gürgül S., Celik A. (2007). Cytogenetic effects of extremely low frequency magnetic field on Wistar rat bone marrow. *Mutat Res*;630:69-77.
- Erickson E.H. (1982). Evidence for electrostatic enhancement of odor receptor function by worker honeybee antennae. *Bioelectromagnetics*;3:413-420.
- Eskelinen T., Keinänen J., Salonen H., Juutilainen J. (2002). Use of spot measurements for assessing residential EBF magnetic field exposure: a validity study. *Bioelectromagnetics*;23:173-176.
- Falone S., Grossi M.R., Cinque B. et al. (2007). Fifty hertz extremely low-frequency electromagnetic field causes changes in redox and differentiative status in neuroblastoma cells. *Int J Biochem Cell Biol.*;39:2093-106.
- Fedrowitz M., Löscher W. (2008). Exposure of Fischer 344 rats to a weak power frequency magnetic field facilitates mammary tumorigenesis in the DMBA model of breast cancer. *Carcinogenesis*;29:186-93.
- Feychting M., Ahlbom A. (1993). Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am J Epidemiol.*;138:467-481.
- Fields R.D., Lange G.D. (1980). Electoreception in the Ratfish (*Hydrolagus colliei*). *Science*;207:547-548.
- Fiorani M., Biagiarelli B., Vetrano F. et al. (1997). In vitro effects of 50 Hz magnetic fields on oxidatively damaged rabbit red blood cells. *Bioelectromagnetics*;18:125-131.
- Fleissner G., Holtkamp-Rötzler E., Hanzlik M. et al. (2003). Ultrastructural analysis of a putative magnetoreceptor in the beak of homing pigeons. *J Comp Neurol.*;458:350-360.
- Foster K.R. (2003). Mechanisms of interactions of extremely low frequency electric fields and biological systems. *Radiation protection Dosimetry*;106(4):301-310.
- Franckel, R.B., Blackmore R.P. (1989). Magnetite and magnetotaxis in microorganisms. *Bioelectromagnetics*;10:223-237.
- Frenette Y., Barre B. (2007). Évaluation de l'exposition potentielle de coiffeuses aux champs magnétiques d'extrême basse fréquence provenant de séchoirs à cheveux. *Travail et santé, Canada*;23(3).
- Friedman D.R., Hatch E.E., Tarone R. et al. (1996). Childhood exposure to magnetic fields: Residential area measurements compared to personal dosimetry. *Epidemiology*;7:151-155.
- Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Phys Med Biol.*;41(11):2251-69.
- García A.M., Sisternas A., Hoyos S.P. (2008). Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol.*;37(2):329-40.

- Gauger J.R. (1984). Household appliance magnetic field survey. Arlington, Virginia, Naval Electronic Systems Command. ITT Research Institute Report EO 6549-3.
- Greenland S., Sheppard A.R., Kaune W.T. et al. (2000). A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukaemia. *Epidemiology*;11:624-634.
- Hjeresen D.L., Kaune W.T., Decker J.R., Phillips R.D. (1980). Effects of 60-Hz electric fields on avoidance behavior and activity of rats. *Bioelectromagnetics*;1:299-312.
- Hoang N., Schleicher E., Kacprzack S. et al. (2008). Human and Drosophila cryptochromes are light activated by flavin photoreduction in living cells. *Plos Biol.*;6(7):e160doi: 10.1371/journal.pbio.0060160.
- Hsu C.Y., Ko F.Y., Li C.W. et al. (2007) Magnetoreception system in Honeybees (*Apis mellifera*). *Plos ONE*;2(4):e395.
- IARC (2002). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Volume 80:445p.
- ICNIRP (2003). Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0 - 100 kHz).
- ICNIRP (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.*;74:494-522.
- ICNIRP (2009). Limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz-100 kHz). Draft guideline posted for comments.
- Ishisaka R., Kanno T., Inai Y. et al. (2000). Effect of magnetic fields on the various functions of subcellular organelles and cells. *Pathophysiology*;7:149-152.
- Jaite J., Grzegorzczak J., Zmyslony M., Rajkowska E. (2002). Effect of 7 mT static magnetic field and iron ions on rat lymphocytes: apoptosis, necrosis and free radicals processes. *Bioelectrochemistry*;57:107-111.
- Juutilainen J. (2008). Do electromagnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? *Radiat Prot Dosimetry*;132(2):228-31.
- Kalmijn A.D. (1982). Electric and magnetic field detection in Elasmobranch Fishes. *Science*;218:616-618.
- Kalmijn A.D. (1966). Electro-perception in Sharks and Rays. *Nature*;212:1232-1233.
- Kato M., Ohta S., Shimizu K. et al. (1989). Detection-threshold of 50-Hz electric fields by human subjects. *Bioelectromagnetics*;10:319-327.
- Kaune W.T., Phillips R.D. (1980). Comparison of the coupling of grounded humans, swine and rats to vertical, 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics*;1:117-129.
- Kaune W.T., Savitz D.A. (1994). Simplification of the Wertheimer-Leeper wire code. *Bioelectromagnetics*;15:275-282.
- Kelfkens G., Pruppers M. (2005). Guidelines for the calculation of the specific 0.4 microtesla zone in the vicinity of overhead high-voltage power lines. Bilthoven : National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- Kheifets L., Sahl J.D., Shimkhada R., Repacholi M.H. (2005). Developing policy in the face of scientific uncertainty : interpreting 0.3 microT or 0.4 microT cutpoints from EMF epidemiologic studies. *Risk Anal.*;25:927-35.
- Kheifets L., Bowman J.D., Checkoway H. et al. (2009). Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: Review and recommendations. *Occup Environ Med.*;66(2):72-80.

- Kheifets L., Oksuzyan S. (2008). Exposure assessment and other challenges in non-ionizing radiation studies of childhood leukaemia. *Radiat Prot Dosimetry*;132(2):139-47.
- Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Woodford B.J. (1992). Magnetite biomineralisation in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA*;89:7683-7687.
- Kirschvink J.L., Padmanabha S., Boyce C.K., Oglesby J. (1997). Measurement of the threshold sensitivity of honeybees to weak, extremely low-frequency magnetic fields. *J Exp Biol*;200:1363-1368.
- Khouchafi A., Martinez D.M., Zheng Lu M. (2009). Étude du champ électrique et magnétique à très basses fréquences dans le contexte de l'exposition des personnes aux TBF. Rapport de stage SUPÉLEC.
- Laget P. (1970). Biologie et physiologie des éléments nerveux. Masson, Paris.
- Li P., McLaughlin J., Infante-Rivard C. (2009). Maternal occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and the risk of brain cancer in the offspring. *Cancer Causes Control*;20(6):945-55.
- Lohmann K.J., Johnsen S. (2000). The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *Trends Neurosci*;23:153-159.
- London S. J., Thomas D. C., Bowman J. D. et al. (1991). Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol*;134:923-937.
- Maddock B.J. (1992). Overhead line design in relation to electric and magnetic field limits. *Power Eng Journal*;6:217-224.
- Massot O., Grimaldi B., Bailly J.-M. et al. (2000). Magnetic field desensitizes 5-HT_{1B} receptor in brain: pharmacological and functional studies. *Brain Res*;858:143–150.
- McBride M.L., Gallagher R.P., Theriault G. et al. (1999). Powerfrequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. *Am J Epidemiol*;149:831-842.
- McNamee D.A., Legros A.G., Krewski D.R. et al. (2009). A literature review: The cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health*;82(8):919-33.
- Merckel O., Azoulay A., Letertre T. (2009). Caractérisation de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences dans la commune de Champlan. *Env., Risques & Santé*;8(3):237-44.
- Mora C.V., Davison M., Wild J.M., Walker M. (2004). Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon. *Nature*;432:508-11.
- Mouritsen H., Feenders G., Liedvogel M. et al. (2005). Night-vision brain area in migratory songbirds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*;102:8339-8344.
- NIEHS (1998). Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. National Institute of Environmental Health Sciences Working Group Report. Portier CJ, Wolfe MS, eds. Research Triangle Park, NC, National Institute of Health. NIH Publication;98-3981.
- NRC (1997). Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. National Research Council, Washington: National Academy Press.
- OMS (2005). Champs électromagnétiques et santé publique. Aide-mémoire n°296. www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/fr
- OMS (2007). Champs électromagnétiques et santé publique. Aide-mémoire n°322.
- Osterberg K., Persson R., Karlson B. et al. (2007). Personality, mental distress, and subjective health complaints among persons with environmental annoyance. *Hum Exp Toxicol*;26(3):231-41.

- Preston-Martin S., Navidi W., Thomas D. et al. (1996). Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol.*;143:105-119.
- Repacholi M.H., Greenebaum B. (1999). Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*;20:133-160.
- RIVM - Dusseldorp A., Pruppers M.J.M., Bolte J.F.B. et al. (2009). Verkenning van extreem-laag (ELF) magnetische velden bij verschillende bronnen. Rapport 609300011/2009.
- Rollier Y. (1988). Les effets des champs électromagnétiques dans le voisinage des lignes et postes à haute tension. *Bulletin ASE/UCS*;79(22):1390-1397.
- Röösli M., Lörtscher M., Egger M. et al. (2007). Leukaemia, brain tumours and exposure to extremely low frequency magnetic fields: cohort study of Swiss railway employees. *Occupational and Environmental Medicine*;64(8).
- RTE et EDF (2006). Les champs électromagnétiques de très basse fréquence. www.rte-france.com
- Rubin G.J., Das Munshi J., Wessely S. (2005). Electromagnetic hypersensitivity: A systematic review of provocation studies. *Psychosom Med.*;67(2):224-32.
- Sagan P.M., Stell M.E., Bryan G.K., Adey W.R. (1987). Detection of 60-Hertz vertical electric fields by rats. *Bioelectromagnetics*;8:303-313.
- Sahebamei H., Abdolmaleki P., Ghanati F. (2007). Effects of magnetic field on the antioxidant enzymes activities of suspension-cultured tobacco cells. *Bioelectromagnetics*;28:42-47.
- Santini M.T., Rainaldi G., Indovina P.L. (2009). Cellular effects of extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields. *Int J Radiat Biol.*;85(4):294-313.
- Savitz D.A., Liao D., Sastre A. et al. (1999). Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol.*;149(2):135-42.
- Scaiano J.C., Mohtat N, Cozens F.L. et al. (1994). Application of the radical pair mechanism to free radicals in organized systems: can the effects of 60 Hz be predicted from studies under static fields? *Bioelectromagnetics*;15: 549-554.
- SCENIHR (2009). Health Effects of Exposure to EMF. Brussels: European Commission, Health and Consumers DG:83p.
- SCENIHR (2007). Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF). Brussels: European Commission, Health and Consumers DG:64p.
- Schiffman A., Breyse P.N., Kanchanaraks S. et al. (1998). Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposures of Office Workers. *Applied Occupational Environmental Hygiene*;13(11):776-781.
- Schoenfeld E.R., Henderson K., O'Leary E. et al. (1999). Magnetic field exposure assessment: a comparison of various methods. *Bioelectromagnetics*;20:487-496.
- Schüz J., Grigat J.P., Brinkmann K., Michaelis J. (2001). Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia: results from a German population-based case-control study. *Int J Cancer*;91(5):728-735.
- Schüz J., Svendsen A.L., Linet M.S. et al. (2007). Nighttime exposure to electromagnetic fields and childhood leukemia: An extended pooled analysis. *Am J Epidemiol.*;166(3):263-9.
- Solov'yov I.A., Schulten K. (2009). Magnetoreception through cryptochrome may involve superoxide. *Biophysical Journal*;96: 4804-4813.
- Stern S., Laties V.G. (1985). 60-Hz electric fields: detection by female rats. *Bioelectromagnetics*;6:99-103.

- Stern S., Laties V.G. (1989). Comparison of 60-Hz electric fields and incandescent light as aversive stimuli controlling the behavior of rats. *Bioelectromagnetics*;10(1):99-109.
- Stern S., Laties V.G., Stancampiano C.V. et al. (1983). Behavioral detection of 60-Hz electric fields by rats. *Bioelectromagnetics*;4:215-247.
- Steiner U.E., Ulrich T. (1989). Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena, *Chem. Rev.*;89(1):51–147.
- Taki M., Suzuli Y., Wake K. (2003). Dosimetry considerations in the head and retina for extremely low frequency electric fields. *Radiation Protection Dosimetry*;106:349-356.
- Taoka S., Padmakumar R., Grissom C.B., Banerjee R. (1997). Magnetic fields effects on coenzyme B12-dependant enzymes: validation of ethanolamine ammonia lyase results and extension to human methylmalonyl CoA mutase. *Bioelectromagnetics*;18:506-513.
- Turro N.J. (1983). Influence of nuclear spin on chemical reactions: Magnetic isotope and magnetic field effects (A review). *Proc Natl Acad Sci U S A.*;80(2):609-621.
- UKCCS (1999). Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators. *Lancet*;354:1925-1931.
- Valberg P.A., Kavet R., Rafferty C.N. (1997). Can low-level 50/60 Hz electric and magnetic fields cause biological effects? *Radiation Research*;148:2-21.
- Vijayalaxmi, Prihoda, T.J. (2009). Genetic damage in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electro-magnetic fields: a meta-analysis of data from 87 publications (1990-2007). *Int J Radiat Biol.*;85(3):196-213.
- Vistnes A.L., Ramberg G.B., Bjornevik L.R. et al. (1997). Exposure of children to residential magnetic fields in Norway: is proximity to power lines an adequate predictor of exposure? *Bioelectromagnetics*;18:47-57.
- Walleczek J. (1995). Magnetokinetic effects on radical pairs: a paradigm for magnetic field interactions with biological systems at lower than thermal energy. in « Electromagnetic fields, biological interactions and mechanisms ». Ed. by Blank M, *Advances in Chemistry series*, American Chemical Society, Washington DC.
- Wang H.Y., Zeng X.B., Guo S.Y., Li Z.T. (2008). Effects of magnetic field on the antioxidant defense system of recirculation-cultured *Chlorella vulgaris*. *Bioelectromagnetics*;29:39-46.
- Weigel R.J., Jaffe R.A., Lundstrom D.L. et al. (1987). Stimulation of cutaneous mechanoreceptors by 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics*;8:337-350.
- Wertheimer N., Leeper E. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol.*;109:273-284.
- WHO (2007). Extremely low frequency fields. *Environmental Health Criteria*;238:543p.
- Yasui M., Kikuchi T, Ogawa M. et al. (1997). Carcinogenicity test of 50Hz sinusoidal magnetic fields in rats. *Bioelectromagnetics*;18:531-40.
- Zmyslony M., Rajkowska E., Mamrot P. et al. (2004). The effect of weak 50 Hz magnetic fields on the number of free oxygen radicals in rat lymphocytes in vitro. *Bioelectromagnetics*;25:607-612.

Annexes

Annexe 1 : Lettre de saisine



MINISTÈRE DE LA SANTÉ, DE
LA JEUNESSE, DES SPORTS ET
DE LA VIE ASSOCIATIVE

MINISTÈRE DU TRAVAIL, DES
RELATIONS SOCIALES, DE LA
FAMILLE ET DE LA SOLIDARITÉ

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE
L'ÉNERGIE, DU
DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'AMÉNAGEMENT DU
TERRITOIRE

Direction générale de la santé

Direction générale du travail

Direction de la prévention des
pollutions et des risques

Direction générale de l'énergie
et des matières premières

Paris le **25 JUIN 2008**

080398

Le Directeur général de la santé

Le Directeur de la prévention des
pollutions et des risques

Le Directeur général de l'énergie et des
matières premières

Le Directeur général du travail
à

Monsieur le Directeur général par interim
de l'Agence Française de Sécurité
Sanitaire de l'Environnement et du Travail
253 Avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort

Objet : Expertise relative aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence

Monsieur le Directeur général,

Suite au classement en 2001 par le Centre international de recherche contre le cancer (CIRC) des champs électromagnétiques extrêmement basse-fréquence en catégorie 2B et d'une saisine du directeur général de la santé, le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) a publié en novembre 2004 un rapport intitulé « Champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence et santé » et formulé des recommandations, en particulier de mieux cerner l'exposition de la population française.

Depuis un certain nombre d'études scientifiques et de rapports de synthèse relatifs aux effets sanitaires des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence ont été publiés. D'autres études, portant notamment sur l'exposition aux champs électromagnétiques à basse fréquence ou sur leurs effets potentiels, sont actuellement menées en France.

L'impact potentiel des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence sur la santé humaine reste une source de questionnement pour les chercheurs et de préoccupation pour la population, ainsi que l'ont montré les travaux du Grenelle et notamment du comité opérationnel 19.

Dans ce contexte, nous vous demandons de :

- 1) Réaliser une synthèse des travaux de l'expertise internationale disponible et relative aux effets sanitaires des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence depuis le rapport du CSHPF de 2004 (notamment l'Environmental Health Criteria Monograph n°238 de l'OMS et les travaux du SCENIHR).
- 2) Faire le point des études en cours sur ce sujet. Plus particulièrement, vous veillerez à :
 - assurer un retour des conclusions de l'étude pilote menée à Champlan (résultats rendus publics mi mai 2008) ;
 - procéder à une analyse de la méthodologie de l'étude Experts visant à évaluer l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence ;
 - effectuer, sur la base des éléments qui peuvent être disponibles, une analyse méthodologique de l'étude du CRIIREM menée dans l'ouest de la France dont les résultats semblent prévus pour le mois de juillet 2008.
- 3) Faire des recommandations et propositions afin de mieux quantifier le niveau d'exposition de la population française aux champs électromagnétiques. A cette fin, vous chercherez à établir la contribution des différents équipements et situations à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (lignes HT, transformateurs électriques, transports ferroviaires électrifiés, équipements électriques domestiques, etc.).
- 4) Faire des propositions d'études et de recherches pour améliorer les connaissances scientifiques dans le domaine des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence et de leurs impacts potentiels sur la santé et notamment pour étudier la possibilité de disposer de valeurs cibles d'exposition sur le long terme.
- 5) Elaborer des supports d'information pour le public, notamment via le dossier « Enjeux et clefs de lecture, Santé-Environnement », qui pourraient être accessibles sur le portail santé environnement. Enfin, nous vous demandons d'effectuer une veille scientifique permanente sur ce sujet.

En ce qui concerne les délais, nous vous saurions gré de bien vouloir nous faire parvenir le résultat de vos travaux pour les points 1 et 2 pour le 15 juillet 2008.

Enfin, vous voudrez bien nous faire parvenir une note de cadrage concernant l'organisation de vos travaux, et notamment nous préciser les délais envisageables pour la réalisation des points 3, 4 et 5.

**Le Directeur général
de la santé**



Didier HOUSSIN

**Le Directeur de la prévention des
pollutions et des risques**



Laurent MICHEL

**Le Directeur général de l'énergie et des
matières premières**



Pierre-Franck CHEVET

Le Directeur général du travail



Jean-Denis Combrexelle

Annexe 2 : Caractéristiques du champ électromagnétique

Amplitudes et valeurs efficaces

Les signaux associés aux champs électrique ou magnétique ayant une fréquence non nulle ont une forme sinusoïdale. La valeur moyenne de l'amplitude de ces signaux est nulle, dans le temps comme dans l'espace. Si on note A l'amplitude, c'est-à-dire la valeur maximale que le signal peut prendre à un instant ou un endroit donné, on caractérise par défaut ces signaux par leur valeur efficace, qui vaut $A/\sqrt{2}$. C'est la valeur par défaut mesurée par les appareils (de type Emdex) donnant une valeur numérique pour quantifier le champ.

Champ vectoriel, champ scalaire

Les champs magnétiques et électriques sont des quantités vectorielles. Elles traduisent, par leur amplitude, la force qui s'exercera sur un objet chargé placé à l'endroit où les champs sont présents. Le sens et la direction du vecteur associé au champ sont liés au sens et à la direction de la force qui sera exercée. Pour déterminer le champ vectoriel, il faut un détecteur (dans le cas du champ magnétique, un magnétomètre) à 3 axes dont chacun donne la composante du champ sur les 3 directions de l'espace.

Plus souvent, on se limite à la connaissance de l'amplitude du champ s'il est statique (fréquence nulle), ou à sa valeur efficace dans le cas d'un champ sinusoïdal alternatif, indépendamment de la direction et du sens. Dans ce cas, on utilise des instruments scalaires, comme les magnétomètres du commerce, qui calculent la valeur efficace du champ à partir des 3 composantes, ou qui utilisent un principe physique (comme une méthode spectroscopique) permettant d'accéder directement et uniquement à la valeur efficace du champ. Ce sont ces derniers instruments qui sont les plus simples à utiliser puisqu'ils fournissent directement un nombre qui est la valeur efficace du champ. Par exemple, $B_{\text{eff}} = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ où B_x , B_y et B_z sont les valeurs efficaces respectives des 3 composantes du champ magnétique. Néanmoins, l'information fournie est naturellement réductrice. Une bonne compréhension du principe de mesure est nécessaire pour bien interpréter les résultats, en particulier vis-à-vis de la bande de fréquence mesurée par l'instrument.

Notions de champ proche et de champ lointain

On peut montrer que, dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent sans atténuation à grande distance. C'est cette propriété qui nous permet de recevoir la lumière du soleil, comme celle des étoiles. Cependant, comme le rayonnement électromagnétique créé par une source donnée est *a priori* diffusé dans toutes les directions, la puissance reçue par unité de volume diminue avec la distance. Si la distance par rapport à la source est grande comparée à la longueur d'onde, on parle de conditions en champ lointain, si la source est proche, on parle de conditions en champ proche. Dans le cas des signaux associés à la production d'électricité, nous sommes toujours en conditions de champ proche puisque la longueur d'onde à 50 Hz est de 6 000 kilomètres. On ne parle donc pas de propagation mais plutôt de valeurs locales des champs.

Atténuation naturelle des champs, effet de peau

Les champs magnétiques comme électriques ont la propriété d'être atténués lorsqu'ils pénètrent dans un matériau. L'épaisseur typique de matériau qu'ils doivent traverser pour être atténués s'appelle l'épaisseur de peau. L'effet de peau signale donc que les champs sont présents en surface des matériaux sur une épaisseur δ qui dépend de la fréquence f , de la conductivité

électrique σ du matériau et de sa perméabilité magnétique μ selon $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$.

À titre d'exemple, cette épaisseur est de l'ordre de 9 mm à 50 Hz pour du cuivre. Lorsqu'on « enferme » un circuit électrique dans une enceinte métallique afin d'éviter les interactions avec l'environnement, on crée ce qui s'appelle communément une cage de Faraday. Par exemple, les enceintes métalliques de fours micro-ondes sont une cage de Faraday pour les micro-ondes générées en leur sein. Plus les fréquences d'intérêt sont faibles, plus l'épaisseur du blindage doit être grande. Sans précautions particulières, les fréquences les plus faibles peuvent donc traverser la cage. Néanmoins, les champs électriques statiques ne peuvent pas pénétrer une cage de Faraday, contrairement aux champs magnétiques qui nécessitent des matériaux de forte perméabilité magnétique, appelés mu-métaux (ou μ -métaux), pour être atténués.

Force magnétique exercée

L'interaction entre un champ magnétique et son environnement est liée aux forces magnétiques s'exerçant sur les particules chargées Q . Les directions des forces sont perpendiculaires au champ magnétique local B : $F_{\text{magnétique}} = Q \ v \ B$ où v est la vitesse des particules chargées. Cette force existe donc si, à la fois, certaines charges se déplacent au voisinage du point d'intérêt pour créer le champ (dans le cas du transport de courant électrique par exemple) et si les charges subissant le champ se déplacent également. Ce dernier déplacement peut aussi être microscopique, dans le cas où le système sous influence possède par exemple un moment dipolaire magnétique, voire quadripolaire, associé au mouvement ordonné des électrons autour de leurs noyaux. Dans ce cas, les forces magnétiques correspondent à un couple s'exerçant sur le dipôle magnétique, en le faisant tourner, de la même manière que le champ magnétique terrestre fait tourner l'aiguille aimantée d'une boussole.

Courants de Foucault

Dans le cas où le matériau possède un moment dipolaire magnétique et qu'il est soumis à une force magnétique variable alternative, il va tenter de s'opposer aux variations du flux magnétique en respectant la loi de Lenz, qui s'exprime quantitativement par la loi de Faraday. Une force électromotrice, c'est-à-dire une différence de potentiel ou tension électrique, est créée entre différents points du matériau soumis au champ variable. Dans le cas où le matériau est conducteur, cette différence de potentiel va conduire à des courants, appelés courants de Foucault, qui peuvent perturber le matériau, tout au moins à sa surface, sur une distance de l'ordre de l'épaisseur de peau. Ces courants peuvent à leur tour engendrer un échauffement en se dissipant dans le matériau résistif. Ils existent par exemple dans les transformateurs, ce qui explique pourquoi le noyau de fer doux de ces derniers est « laminé » (coupé en fines tranches séparées d'un isolant) pour augmenter la résistance et diminuer de ce fait les pertes par dissipation thermiques (pertes fer) et les courants de Foucault.

Énergie d'interaction

Une interaction entre un champ magnétique créé par un système extérieur et un matériau conduit, comme on vient de le voir, à des déplacements de charge dans le matériau. Une énergie est donc communiquée à celui-ci. Elle s'exprime sous la forme $E_{\text{int}} = -\dot{\vec{M}} \cdot \vec{B}$ où M est le moment magnétique total de la substance. Elle est donc proportionnelle au champ B et dépend de l'orientation relative du champ magnétique avec les moments dipolaires magnétiques de la substance. Elle est nulle en moyenne au premier ordre pour un matériau non magnétique mais peut néanmoins exister localement en raison de fluctuations thermiques dans le matériau. Elle peut aussi exister si des courants de Foucault sont générés, dans le cas des matériaux conducteurs.

Annexe 3 : Documents relatifs à l'enquête citoyenne du Criirem

Annexe 3.1 : Le livret de l'enquêteur

Livret de l'enquêteur



Janvier 2008

« VIVRE AVEC UNE LIGNE THT ? »

Nom de l'enquêteur :

(riirem

Centre de Recherche et d'Information Indépendantes
sur les Rayonnements Electromagnétiques

11 rue Edith Piaf – 72 000 Le Mans
contact@criirem.org – tél : 02 43 21 18 69
www.criirem.org

Association 1901 N° 0723011863
Siret n° : 487 430 639 00012

Collectif Ille et Vilaine sous tension

Maison des associations
22 rue du Tribunal, 35300Fougères

Collectif Manche sous tension

Le Maine 50720 Saint Cyr du Bailleul

Collectif Mayenne Survoltée

Maine, rue des Landes, 53380 St Hilaire du Maine
www.mayennesurvoltee.com

Table des matières

L'enquête « Vivre avec une ligne THT ? »	2
Les partenaires	2
Le périmètre de l'enquête	4
Le protocole de l'enquête	5
Comment conduire une interview	5
Conduite de l'interview	6
Comment utiliser le questionnaire ?	8
Les documents de l'enquêteur	8
Présentation	8
Préparation du questionnaire	9
Gestion de l'interview	9
Clôture	11

L'enquête « Vivre avec une ligne THT ? »

Ne disposant pas en France de données sur les conditions de vie à proximité des lignes à très haute tension (THT), les collectifs créés suite au projet de ligne THT Cotentin -Maine sur les 3 départements Ille et Vilaine, Manche, Mayenne ont décidé de conduire une enquête auprès des populations habitant sous les lignes THT ou susceptibles d'y habiter demain.

Cette enquête est une première en France.

La conception du questionnaire et le traitement des données sont assurés par le (riirem).

Les conclusions de cette enquête amèneront une liste de recommandations sur les orientations du nouveau projet de ligne THT. Un rapport de présentation des différentes recommandations conclura l'étude.

Ce travail enrichira les données déjà collectées au niveau international. Ce sera un élément supplémentaire pour justifier la révision des normes et règles de protections des habitants et travailleurs vivant à proximité des lignes THT.

Les partenaires

Le (RIIREM)

Le (riirem) : « Comité de Recherche et d'Information Indépendant sur les Rayonnements ElectroMagnétiques non ionisants », se déclare : « pour une

expertise et une information indépendante, sur les rayonnements électromagnétiques ambiants ! »

Quel est l'impact de ces rayonnements sur le vivant ? Quels sont les risques, biologiques ou sanitaires, de ces technologies ? Comment s'en protéger et réduire notre exposition et celle de nos enfants ?

Face aux discours rassurants des pouvoirs publics et des industriels, ces questions légitimes deviennent polémiques. Pourtant, le grand public, les professionnels du bâtiment, de la santé, les élus, les consommateurs, ont besoin d'une information claire, objective, distincte des intérêts industriels impliqués.

« Informer, mesurer, proposer... » Ces principes d'action sont les trois axes de travail choisis par le (riirem). A la fois centre de ressources et laboratoire de recherches, doté d'un conseil scientifique européen, le (riirem intervient pour faire avancer le débat.

« Il ne s'agit pas d'être contre l'innovation technologique, mais de se doter de moyens pour vérifier l'innocuité de celle-ci sur la santé de la population », a déclaré Michèle Rivasi, Présidente du (riirem. « Par exemple, pour les lignes à haute tension et la téléphonie mobile, les faits et les preuves des effets thermiques et non thermiques des rayonnements électromagnétiques existent, les bonnes pratiques de prévention aussi. Il est temps que cela se sache et de libérer l'information pour agir dans l'intérêt des citoyens »

Conseil scientifique du (riirem

Le « comité des sages », est composé d'experts et spécialistes de l'électromagnétisme naturel, biologique et artificiel :

- **Joseph Agie de Selsaten**, Dr ès Sciences, Président de Teslabel ;
- **Jean-Claude Albaret**, Dr en médecine ;
- **Madeleine Bastide**, Pr en immunologie ;
- **Pierre Cornillot**, Fondateur et Doyen de la faculté de médecine de Bobigny ;
- **Laurence Bonhomme Faivre**, Pharmacien hospitalier, universitaire ;
- **Claudio Gomez-Perreta**, Dr en médecine, Hospital Lafé, Valencia ;
- **Catherine Gouhier**, Consultante CEM ;
- **Madeleine Madoré**, Pharmacien ;
- **Pierre Le Ruz**, Dr en physiologie animale, professeur hors classe ;
- **Eliane Spiteri**, Dr en médecine.

La Coordination interrégionale

La coordination interrégionale des collectifs contre la THT et l'EPR est un lieu de concertation et de coordination qui rassemble les collectifs Ille et Vilaine Sous Tension, Manche Sous Tension et Mayenne Survoltée.

Les objectifs de ces collectifs sont :

- Informer les élus et la population sur le projet de nouvelle ligne très haute tension (THT) dans leur département, liée à la future centrale nucléaire EPR de Flamanville.
- S'opposer à ces projets.
- Promouvoir toutes initiatives permettant d'améliorer la maîtrise et l'efficacité énergétique ainsi que le développement des énergies renouvelables.

Le comité de pilotage

Le comité de pilotage est chargé de valider les différentes étapes de l'enquête, publications finales et de garantir l'objectivité de l'enquête. Il est composé de :

- Représentants des associations :
 - o Mayenne Survoltée,
 - o Manche sous Tension,
 - o Ille et Vilaine sous Tension,
- Représentants du monde agricole :
 - o Confédération paysanne,
 - o Coordination rurale,
 - o FDSEA,
- Représentants des élus locaux ;
- Le Criirem.

Le périmètre de l'enquête

L'enquête se déroule sur trois secteurs auprès des personnes habitants ou travaillant :

- Dans une zone de 300m de chaque côté de la ligne Flamanville / Domloup ;
- Dans la zone de 300m de chaque côté de la ligne Domloup/Les Quintes ;
- Sur le fuseau de l'éventuelle ligne « Cotentin-Maine ». Ces personnes serviront de population témoin.



Le protocole de l'enquête

Un questionnaire, préparé par le conseil scientifique de l'riirem et les collectifs « Ille et Vilaine sous Tension », « Manche sous Tension » et « Mayenne Survoltée », sera rempli par des équipes d'enquêteurs qui rencontreront les familles afin de récolter des données sur les conditions de vie à proximité des lignes THT.

Ces enquêteurs sont managés par des coordinateurs formés par le CRIIREM.

Un deuxième temps sera consacré à la mise en grilles des données récoltées et à leur exploitation par la méthode Benzekri, par des étudiants en Mathématiques Appliquées, niveau master ou doctorat.

Un rapport des conclusions de cette étude sera remis avec une description de la méthode utilisée.

Comment conduire une interview

Conduire une interview avec succès demande quelques précautions. Chaque interview est une nouvelle source d'informations, il faut la rendre intéressante et agréable.

Etablir de bons rapports avec l'enquêté(e)

L'enquêté(e) peut être n'importe quel adulte compétent du ménage.

Au début d'une interview, l'enquêteur et l'enquêté sont des étrangers l'un pour l'autre. La première impression que l'enquêté(e) aura de vous influera sur sa volonté à coopérer à l'enquête. Assurez-vous que votre attitude est amicale quand vous vous présentez.

Faites, dès le début, une bonne impression.

Commencez l'interview avec un sourire et présentez-vous. Ensuite vous pouvez dire « Nous menons une enquête sur les impacts des lignes THT dont vous avez certainement entendue parler. Je voudrais vous poser quelques questions. »

L'introduction du questionnaire doit être lue telle qu'elle est exactement rédigée.

Adoptez toujours une approche positive.

N'adoptez jamais un air d'excuses, et n'utilisez pas des expressions telles que "Êtes-vous trop occupé ?". Une telle question risque d'entraîner un refus avant même de commencer. Dites plutôt "Je voudrais vous parler quelques instants."

Mettez l'accent sur le caractère confidentiel des réponses.

Si l'enquêté hésite à répondre à l'interview ou demande à quoi serviront ces informations, expliquez que les données que vous recueillez resteront confidentielles, qu'aucun nom d'individu ne sera utilisé et que tous les renseignements seront mis en commun pour rédiger un rapport. Vous ne devez jamais mentionner d'autres interviews ou montrer des questionnaires complétés à d'autres enquêteurs ou enquêtrices ou à toute autre personne.

Répondez franchement aux questions de l'enquêté(e).

Avant d'accepter d'être interviewé, l'enquêté peut vous poser quelques questions concernant l'enquête ou la façon dont on l'a sélectionné. Soyez direct et aimable quand vous répondez. L'enquêté(e) peut également s'inquiéter de la durée de l'interview. Dites-lui que d'habitude l'interview prend environ entre 20 à 30 minutes. Précisez que vous êtes disposé à revenir à un autre moment si nécessaire.

Conduite de l'interview**Soyez neutre pendant toute l'interview.**

La plupart des gens sont polis et ont tendance à donner les réponses qu'ils pensent que vous souhaitez entendre. Il est très important que vous restiez absolument neutre en posant les questions. Soit par l'expression du visage ou le ton de la voix, ne donnez jamais l'impression d'approuver ou de désapprouver une des réponses de l'enquêté(e).

Si l'enquêté(e) donne une réponse ambiguë, essayez d'approfondir de façon neutre, en posant des questions telles que : « Pouvez-vous expliquer un peu plus » ? « Je n'ai pas bien compris, pouvez-vous répéter » ? « On n'est pas pressé, prenez le temps de réfléchir ».

Un enquêté peut vous poser des questions au cours de l'interview ; Dites-lui que ses questions sont intéressantes et que vous lui répondrez du mieux que vous pourrez après avoir terminé le questionnaire, mais dans la limite de vos compétences en disant que vous n'êtes ni un médecin ni un expert en la matière.

Ne suggérez jamais les réponses aux enquêtés.

Si la réponse d'un/une enquêté (e) n'est pas pertinente, ne l'aidez pas en disant quelque chose comme « Je suppose que vous voulez dire que.... ». Très souvent il/elle sera d'accord avec votre interprétation de sa réponse, même si ce n'est pas le cas. Vous devez plutôt approfondir le problème de façon à ce que l'enquêté lui-même trouve la réponse pertinente.

Ne changez pas la formulation ou la séquence des questions.

La formulation des questions et leur séquence dans le questionnaire doivent être respectées. Si l'enquêté(e) a mal compris une question, vous devez répéter la question lentement et clairement. Si un doute subsiste, reformulez la question en prenant soin de ne pas en modifier le sens. Donnez seulement le minimum d'informations nécessaires.

Traitez les enquêtés qui hésitent avec tact.

Il se peut que l'enquêté(e) réponde simplement "Je ne sais pas", donne une réponse non pertinente, soit désintéressé, contredise quelque chose qu'il/elle a dit précédemment. Dans de tels cas, vous devez essayer de raviver son intérêt. Passez quelques instants à parler de choses sans rapport avec l'enquête (par exemple, sa ville ou son village, le temps, ses activités quotidiennes, etc.).

Si l'enquêté(e) donne des réponses non pertinentes ou compliquées, ne l'arrêtez pas brusquement, mais écoutez ce qu'il/elle a à dire. Puis, essayez de le/la guider doucement vers la question de départ. On maintient une bonne ambiance pendant une interview quand l'enquêté(e) considère l'enquêteur/enquêtrice comme une personne sympathique, qui met à l'aise qui ne l'intimide pas, et à qui il/elle peut tout dire sans se sentir embarrassé.

Si l'enquêté(e) hésite ou n'accepte pas de répondre à une question, essayez de surmonter son hésitation, en ré expliquant que la même question est posée à toute personne dans la zone d'étude et que les réponses seront mises en commun. Si elle/il continue à refuser, écrivez simplement « **REFUS** » à côté de la question et continuez. A la fin de l'interview, vous pouvez essayer d'obtenir les renseignements manquant mais sans trop insister.

N'ayez pas d'idées préconçues, sur les capacités et les connaissances de l'enquêté.

N'oubliez pas que les divergences entre vous et l'enquêté peuvent influencer sur l'interview. L'enquêté(e), qui croit que vous êtes en désaccord avec lui/elle, peut avoir peur ou se méfier de vous. Pensez toujours à vous comporter et à parler de façon à ce qu'il/elle se sente à l'aise

Ne précipitez pas l'interview.

Posez les questions lentement pour que l'enquêté(e) comprenne bien ce qui lui est demandé. : attendez et donnez-lui le temps de réfléchir. Si l'enquêté(e) se sent bousculé(e) ou si on ne lui permet pas de formuler sa propre opinion, il/elle peut répondre "Je ne sais pas" ou donner une réponse inexacte. Si vous pensez que l'enquêté(e) répond sans réfléchir, simplement pour hâter l'interview, dites lui, « je ne suis pas pressé. Votre opinion est très importante »

Comment utiliser le questionnaire ?

Les documents de l'enquêteur

Chaque enquêteur reçoit de la part du coordinateur de son secteur :

- son livret nominatif de l'enquêteur. La charte de l'enquêteur, en dernière page du livret, doit être signée par l'enquêteur et le coordinateur ;
- une « **fiche enquêteur** » recensant les personnes à enquêter et leurs coordonnées. Elle permettra aussi de cocher les personnes qui souhaiteraient recevoir les conclusions de l'enquête ;
- une carte correspondant à la fiche enquêteur, situant les lieux-dits ;
- un nombre de questionnaires correspondant aux nombre de foyers à enquêter (1 **questionnaire général** et 4 **questionnaires individuels** en moyenne sont prévus par foyer) ;
- les enveloppes à l'ordre du (riirem pour retourner les enquêtes ;
- un « **tableau panel** » permettant d'enregistrer les personnes qui accepteraient d'être à nouveau consultées dans le cadre d'une nouvelle enquête, d'une étude plus précise, de mesure de champs électromagnétiques... La personne devra y apposer sa signature.
- un document récapitulatif des frais engagés par l'enquêteur déplacement, téléphone, affranchissement... qui devra être retourné au coordinateur.

Présentation

Le questionnaire comprend 4 parties :

- partie 1 : « habitation » s'applique à chaque foyer concerné ;
- partie 2 : « lieu de travail » concerne toutes les entreprises y compris les exploitations agricoles ;
- partie 3 : « exploitation agricole » ne concerne que celles-ci ;
- partie 4 : « Questionnaire individuel » dont un formulaire pour chaque personne habitant régulièrement ou occasionnellement sur le site doit être complété.

Au début de l'interview, rappeler la lettre qui a été envoyée, puis lire l'introduction de présentation, dans son entier, sans commentaire.

Précisez bien que :

- l'enquête est strictement anonyme. Les réponses seront traitées exclusivement sous forme de statistiques anonymes. Le (riirem recevra

des questionnaires anonymes et n'aura pas accès aux coordonnées des personnes enquêtées ;

- en aucun cas la participation à l'enquête ne donnera lieu à un démarchage commercial ultérieur ;

Préparation du questionnaire

1. Lire l'introduction du questionnaire et poser la question n°1).
2. Si la réponse est favorable préparer le questionnaire en remplissant le bandeau en haut de page :

Date :	Heure :	Enquêteur (s) :	THT La Prairie - Domloup	G	D	N° :
			THT Domloup - Les Quintes	G	D	
			Fuseau Cotentin - Maine			

Diagramme illustrant le bandeau de préparation du questionnaire avec des cases numérotées a) à f) :

- a) : Date
- b) : Heure
- c) : Enquêteur (s)
- d) : THT La Prairie - Domloup
- e) : THT Domloup - Les Quintes
- f) : Fuseau Cotentin - Maine

- **a) et b)** : préciser la date et l'heure de l'entretien ;
- **c)** : nom et prénom de l'enquêteur ;
- **d)** : tracé concerné ;
- **e)** : le cas échéant, position de l'habitation ou de l'entreprise par rapport à la ligne existante gauche ou droite par rapport à une direction conventionnelle Flamanville -> Domloup->les Quintes (rayer la mention inutile G/D) ;
- **f)** : préciser le n° correspondant à partir de la fiche enquêteur.

Gestion de l'interview

Le questionnaire s'adresse aux personnes vivant ou travaillant dans le fuseau projeté ou à proximité des lignes existantes.

En cas de non réponse mentionner :

- « **NSP** » = l'enquêté ne sais pas, n'a pas les éléments pour répondre ;
- « **Refus** » = l'enquêté ne souhaite pas répondre.

Habitation

Q2 Habiter = pas nécessairement en continu (ex : étudiant).

Q3 Année de construction = pour une construction neuve ou pour un bâtiment rénové : année d'affectation en habitation.

Q8 et 9 : dans la mesure du possible, il serait intéressant d'avoir une indication de valeur.

Q11 à 15 : concernent exclusivement les personnes vivant à proximité d'une ligne. Ne pas poser ces questions sur le fuseau « Cotentin Maine ».

Q11, 25, 35 : les distances mini et maxi entre l'axe de ligne et les habitations sont indiquées sur la « fiche enquêteur ». Faire attention de bien situer l'habitation dans le hameau afin d'estimer au mieux sa distance.

Q17 et 18 : sont relatives aux difficultés exprimées dans les questions 5, 6 et 13 à 15. Elles sont à poser à tous les habitants situés dans le fuseau ou à proximité des lignes.

Lieu de travail

Cette partie concerne toutes les entreprises situées dans la zone d'enquête y compris les exploitations agricoles.

Q25 à 27 : concernent exclusivement les personnes vivant à proximité d'une ligne. Ne pas poser ces questions sur le fuseau « Cotentin Maine ».

Exploitation agricole

Q29 : cette question porte uniquement sur les vaches. Si l'agriculteur n'a pas ce chiffre, ne pas renseigner et marquer « **NSP** » (pour ne sais pas).

Q31 : dans la mesure du possible, il serait intéressant d'avoir des précisions sur les difficultés rencontrées.

Questionnaire individuel

Il doit y avoir un questionnaire par personne habitant occasionnellement ou principalement sur place ainsi qu'un questionnaire par personne décédée dans les 10 dernières années.

Pour chaque questionnaire, le bandeau en haut de page doit comporter les mêmes informations (tout particulièrement « **tracés** » et « **n°** ») que le questionnaire principal. Ceci afin de pouvoir rattacher les questionnaires individuels au questionnaire général.

Il faut récapituler en page 1 du questionnaire principal, le nombre de questionnaires individuels joints, ainsi que les raisons justifiant les éventuels questionnaires manquants.

Récapitulatif questionnaire individuel	
Nombre de questionnaire individuels joints :	
Nombre de personne(s) n'ayant pas de questionnaire individuel :	
Pour quelle raison :	☐ Refus de répondre, ☐ Absent, ☐ Décès

Ce questionnaire étant très personnel il sera proposé aux personnes qui le souhaiteraient de le compléter, sans que l'enquêteur ait connaissance des réponses apportées. Dans ce cas :

- il sera remis à la (aux) personne(s) présente(s) le nombre de questionnaires individuels nécessaires ;
- Les questionnaires seront expliqués rapidement par l'enquêteur ;

- Les questionnaires remplis seront glissés directement dans l'enveloppe retour par le(s) enquêté(s) ;
- Une fois rempli le récapitulatif sur le questionnaire principal, ce dernier est mis à son tour dans l'enveloppe qui sera cachetée devant la personne.

Q36 Age = Age lors du décès pour une personne décédée.

Q40 Principale = 4 jours au moins par semaine ;

Occasionnelle = étudiant, résidence secondaire, gîte...

Q42 Autres troubles graves = autres troubles ou maladies graves que la personne souhaite préciser.

Q43 et 44 : portent sur les consommations d'alcool et tabac qui sont des « facteurs de confusion », disent les spécialistes. Ce sont des variables indépendantes de l'exposition au risque enquêté qui sont nécessaire à la crédibilité de notre enquête.

Si d'autres remarques ou informations sont données, les noter avec les termes employés par l'enquêté au dos de la feuille individuelle.

Clôture

1. l'enquêteur met tous les imprimés collectés dans l'enveloppe à l'adresse du CRIREM ; elle sera cachetée devant les personnes et sera postée immédiatement par l'enquêteur.
2. l'enquêteur demande si la (les) personne(s) souhaite(nt) recevoir les conclusions de l'enquête. Si oui, il le note sur sa fiche récapitulative en vérifiant les coordonnées.
3. l'enquêteur demande si la (les) personne(s) accepteraient de faire partie d'un panel afin d'être à nouveau consultées dans le cadre d'une nouvelle enquête (qui pourrait être reproduite dans le futur afin de mesurer les évolutions), d'étude plus précise, de mesure de champs électromagnétiques. Si oui, il le note sur le « tableau panel » et demande à la personne de signer.
4. Ces enquêtes sont anonymes : le traitement statistique sera réalisé par le CRIREM. Les enquêteurs s'engagent à retourner les documents complétés directement au CRIREM, sans signe distinctif et dans le délai défini.
5. Retourner à votre coordonateur :
 1. votre fiche enquêteur ;
 2. votre tableau panel ;
 3. votre fiche récapitulative de frais.

Merci pour votre engagement et la disponibilité dont vous faite preuve.
Sans vous cette enquête n'existerait pas !

Charte de l'enquêteur

Le comité de pilotage de l'enquête « vivre avec une ligne THT ? » a élaboré cette charte afin que les personnes qui s'engagent dans cette mission aient une parfaite connaissance des exigences à respecter.

Le travail des enquêteurs est essentiel afin de collecter des informations fiables, de qualité, mais aussi pour la crédibilité des résultats de l'enquête.

L'enquêteur « Vivre avec une ligne THT ? » s'engage à :

1. Etablir un rapport cordial, sans préjugés, avec les personnes enquêtées ;
2. Respecter le refus de répondre et traiter les personnes qui hésitent avec tact ;
3. Répondre clairement et précisément aux questions relatives à l'objet et l'exploitation de l'enquête ;
4. Garder une attitude parfaitement neutre en posant les questions ;
5. Ne jamais suggérer les réponses aux enquêtés ;
6. Ne pas donner d'avis sur les réponses proposées ;
7. Reporter à l'issue du questionnaire, vos réponses aux questions éventuellement posées par votre interlocuteur en cours d'interview ;
8. Respecter la formulation et l'ordre des questions ;
9. Respecter une confidentialité totale sur les sources et informations collectées ;
10. Respecter les procédures de gestion des questionnaires et les délais.

Je soussigné enquêteur bénévole, m'engage à respecter scrupuleusement cette charte lors de la conduite de mes interviews et de la gestion des questionnaires de l'enquête « Vivre avec une ligne THT ? ».

Date : Lieu :

L'enquêteur

Le Coordinateur :

Annexe 3.2 : Le questionnaire du Criirem

Date :	Heure :	Enquêteur (s) :	THT Flamanville – Domloup	G	D	N° :
.....			THT Domloup – Les Quintes	G	D	
			Fuseau Cotentin - Maine			

Enquête « Vivre avec une ligne THT ? »

Ne disposant pas en France de données sur les conditions de vie à proximité des lignes à très haute tension (THT), les collectifs créés suite au projet de ligne THT Cotentin -Maine sur les 3 départements Ile et Vilaine Manche Mayenne ont décidé de conduire une enquête auprès des populations habitant sous les lignes THT ou susceptibles d'y habiter demain.

Des élus et les syndicats agricoles sont associés à cette démarche : Notre objectif est de connaître ce qui se dit et ce qui se vit, de recueillir des données concernant l'impact de ces lignes.

Le CRIIREM, le Centre de recherche et d'Information Indépendantes sur les Rayonnements Electromagnétiques a validé cette enquête et se chargera de son traitement.

Les enquêteurs que vous rencontrez ont été formés pour réaliser cette enquête, c'est-à-dire enregistrer votre avis personnel en laissant de côté leur propre opinion.

Bien entendu, cette enquête est totalement anonyme et gratuite : aucune somme d'argent ne peut vous être demandée

Ce questionnaire comporte quatre parties :

- 1) Questions sur la situation générale de l'habitation ;
- 2) Questions spécifiques au lieu de travail
- 3) Questions spécifiques aux exploitations agricoles ;
- 4) Questionnaire individuel relatif à chacun des occupants.

Nous vous remercions pour votre accueil et votre contribution à cette enquête dont les résultats seront connus à la fin du premier semestre 2008.

Si vous souhaitez en recevoir les conclusions, merci me le préciser à notre enquêteur.

Récapitulatif questionnaire individuel

Nombre de questionnaire individuels joints :

Nombre de personne(s) n'ayant pas de questionnaire individuel :

Pour quelle raison : ☐ Refus de répondre,
☐ Absent,
☐ Décès

(riirem

Centre de Recherche et d'Information Indépendantes
sur les Rayonnements ElectroMagnétiques

11 rue Edith Piaf – 72 000 Le Mans
contact@criirem.org – tél : 02 43 21 18 69
www.criirem.org
 Association 1901 N° 0723011863
 Siret n° : 487 430 639 00012

Collectif Ile et Vilaine sous tension

Maison des associations
22 rue du Tribunal, 35300 Fougères

Collectif Manche sous tension

La Mairie 50720 Saint Cyr du Bailleul

Collectif Mayenne Survoltée

Maine, rue des Landes, 53380 St Hilaire du Maine
www.mayennesurvoltee.com

Enquête « Vivre avec une ligne THT ? »

- 1) Acceptez-vous de répondre à ce questionnaire ? Oui ☐ Non ☐

I. HABITATION

- 2) Combien de personnes habitent cette maison ? :
- 3) Quelle est le type d'habitation ?
Maison individuelle ☐ Immeuble ☐ Autres : Année construction :
- 4) Depuis combien de temps habitez-vous ici ?
Moins d'1 an ☐ 1 à 2 ans ☐ 2 à 5 ans ☐ 5 à 10 ans ☐ 10 à 15 ans ☐ Plus de 15 ans ☐
- 5) Avez-vous perçu des perturbations ou parasites sur le fonctionnement de vos appareils HiFi, ménagers, informatiques, radio, téléphone, TV ... ?
Aucune ☐ Parfois ☐ Régulièrement ☐ Quotidiennement ☐
- 6) Ressentez-vous des décharges électriques au contact de parties métalliques ?
Aucune ☐ Parfois ☐ Régulièrement ☐ Quotidiennement ☐
- 7) Êtes-vous ? Propriétaire ☐ Locataire ☐
- 8) Si vous êtes propriétaire, l'évolution de la valeur de votre bien immobilier est-elle en ?
Forte baisse ☐ Baisse ☐ Progression ☐ Forte progression ☐
Pouvez-vous préciser :
Pouvez-vous donner une échelle de valeur :
- 9) Êtes-vous propriétaire d'un logement que vous louez ici ? Oui ☐ Non ☐
Si oui, votre logement se loue-t-il ? Très difficilement ☐ Difficilement ☐ Facilement ☐ très facilement ☐
Pouvez-vous préciser :
Pouvez-vous donner une échelle de valeur :
- 10) Votre habitation se trouve-t-elle à proximité d'une ligne THT ?
Oui ☐ poursuivre le questionnaire Non ☐ passer directement à la question n°17

- 11) Quelle est la distance en mètres (m) entre celle-ci et la ligne ?
Moins de 10 m ☐ 10 à 50 m ☐ 50 à 100 m ☐ 100 à 200 m ☐ 200 à 300 m ☐ Plus de 300 m ☐
- 12) A votre connaissance des personnes ont-elles quitté le lieu suite à l'installation de la ligne ? Oui ☐ Non ☐ Combien :
- 13) La vue de ligne THT est-elle pour vous ?
Sans importance ☐ peu dérangement ☐ gênante ☐ très gênante ☐
Pouvez-vous préciser :
- 14) Le bruit de la ligne est-il pour vous ?
Sans importance ☐ peu dérangement ☐ perturbant ☐ Insupportable ☐
Pouvez-vous préciser :
- 15) Les engagements, promesses que l'on vous avait faits avant l'installation de la ligne ont-ils été respectés ?
Non ☐ En partie ☐ Satisfaisant ☐ Très satisfaisant ☐ Je ne sais pas ☐
Pouvez-vous préciser :
.....

16) En cas de désagrément (s) ayant rapport avec votre habitation, tel que précisé (s) dans les questions précédentes, qui avez-vous contacté ? Quelle écoute avez-vous reçue ?

Pouvez-vous préciser :

17) Vous habitez à proximité d'une ligne THT ou sur la zone d'étude de la future ligne Cotentin-Maine, avez-vous reçu une information concernant l'installation de la ligne ?

Aucune ☐ insuffisante ☐ Satisfaisante ☐ Très satisfaisante ☐

Par qui :

18) La ligne ou la future ligne, présente-t-elle des effets positifs pour vous ? Oui ☐ Non ☐

Lesquels :

II. LIEU DE TRAVAIL

19) Quel est le nombre de personnes travaillant ici ? : *si aucune, passer au questionnaire individuel*

20) Quel est le type d'entreprise ?

Site commercial ou industriel ☐ exploitation agricole ☐ Autres :

Pouvez-vous préciser :

21) Depuis combien de temps travaillez-vous ici ?

Moins d'1 an ☐ 1 à 2 ans ☐ 2 à 5 ans ☐ 5 à 10 ans ☐ 10 à 15 ans ☐ Plus de 15 ans ☐

22) Ressentez-vous du courant dans les masses métalliques ?

Jamais ☐ Parfois ☐ Souvent ☐ Toujours ☐

Est-ce : Sans incidence ☐ Peu gênant ☐ Gênant ☐ Très gênant ☐

Pouvez-vous préciser :

23) Identifiez-vous des perturbations sur l'électronique du matériel (tracteur, machine outils, informatique...) ?

Aucune ☐ Parfois ☐ Régulièrement ☐ Quotidiennement ☐

24) Votre entreprise se trouve-t-elle à proximité d'une ligne THT ?

Oui ☐ Non ☐ passer les questions au chapitre III

25) Quelle est la distance en mètres (m) entre celle-ci et la ligne ?

Moins de 10 m ☐ 10 à 50 m ☐ 50 à 100 m ☐ 100 à 200 m ☐ 200 à 300 m ☐ Plus de 300 m ☐

26) Comment évaluez-vous l'impact de la présence des pylônes sur votre travail ?

Sans incidence ☐ Peu gênant ☐ Gênant ☐ Très gênant ☐

27) Comment évaluez-vous l'impact de la présence des câbles sur votre travail ?

Sans incidence ☐ Peu gênant ☐ Gênant ☐ Très gênant ☐

III. Exploitation agricole

28) Quelles sont vos productions, élevages ?

Lait ☐viande ☐porc ☐ovin ☐volaille ☐Cheval ☐

Autre :

29) Quels sont vos frais vétérinaire par vache et par ans ? :

30) Si vous faites du lait, combien de mois par an livrez-vous du lait en classe AA ?

2 mois ou moins ☐4 mois ☐6 mois ☐8 mois ou plus ☐

31) Avez-vous constaté certaines pathologies sur votre élevage ?

0 = Jamais

1 = Parfois

2 = Souvent

3 = très souvent

Production laitière	0	1	2	3	Tous animaux	0	1	2	3
Nervosité					Réduction de l'abreuvement				
Hésitation, refus d'entrer en salle de traite, fuite en sortie					Diminution de poids				
Traites inégales					Croissance ralentie				
Diarrhées					Agressivité				
Avortement					Cannibalisme				
Mortalité					Dysenterie, entérite, diarrhées				
					Mortalité				
Autres :									

Pouvez-vous préciser :

.....

.....

.....

32) Quelle a été le diagnostic de votre vétérinaire ?

.....

.....

33) Y a-t-il eu amélioration suite aux traitements ? Oui ☐ Non ☐

34) En cas de difficultés identifiées sur l'exploitation, qui avez-vous contacté, quelle écoute avez-vous reçue ?

.....

.....

.....

35) Votre exploitation se trouve t'elle à proximité d'une ligne THT ? Oui ☐ Non ☐

Si oui, quelle est la distance en mètres (m) entre l'élevage et la ligne ?

Moins de 10 m ☐10 à 50 m ☐50 à 100 m ☐100 à 200 m ☐200 à 300 m ☐Plus de 300 m ☐

Date :	Heure :	Enquêteur (s) :	THT Flamanville – Domloup	G	D	N° :
			THT Domloup – Les Quintes	G	D	
			Fuseau Cotentin - Maine			

IV. QUESTIONNAIRE INDIVIDUEL

Cette fiche doit être complétée individuellement pour chaque personne vivant dans l'habitation (y compris pour les personnes décédées dans les 10 dernières années).

36) Sexe : F ☐ M ☐ Ageans (Année décès :)

37) Profession : Si retraité, profession d'origine :

38) Etat civil :

Célibataire ☐ En couple ☐ Divorcé (e) ☐ Veuf (ve) ☐

39) Depuis combien de temps vivez-vous ici ?

Moins d'1 an ☐ 1 à 2 ans ☐ 2 à 5 ans ☐ 5 à 10 ans ☐ 10 à 15 ans ☐ Plus de 15 ans ☐

40) Etes-ce votre habitation ? Principale ☐ Occasionnelle ☐

41) Ressentez-vous ces symptômes ?

0 = Jamais 1 = Parfois 2 = Souvent 3 = très souvent DHD = disparaît hors domicile

	0	1	2	3	DHD		0	1	2	3	DHD
Irritabilité, nervosité						Difficultés de concentration					
Maux de tête						Pertes de mémoire					
Sommeil perturbé						Perturbations auditives					
Etat dépressif						Perturbations visuelles					
Nausées						Problèmes cutanés					
Vertiges						Problèmes cardio-vasculaires					
Troubles digestifs											

42) Autres troubles graves :

.....
.....
.....

43) Quelle est votre consommation de tabac ?

Jamais ☐ Moins de 1 paquet /Jour ☐ Plus d'un paquet /Jour ☐

44) Quelle est votre consommation de boissons alcoolisées journalière ?

Jamais ☐ Moins d'un verre ☐ de 1 à 3 verres ☐ plus de 3 verres ☐

45) Etes-vous porteurs d'une prothèse ? (pacemakers, pompe à insuline, implants crâniens, broches...) Oui ☐ Non ☐

Si oui, laquelle ?

46) Avez-vous constaté des dysfonctionnements ou des désagréments avec votre prothèse ? Oui ☐ Non ☐

Si oui, lesquels ?

47) En cas de difficulté qui avez-vous contacté ? Quelle écoute avez-vous reçue ?

.....
.....

48) Suite aux traitements, vos troubles ont-ils persistés ? Oui ☐ Non ☐

Annexe 4 : Mécanismes d'action du champ électromagnétique extrêmement basses fréquences

Mécanismes indirects impliquant des courants induits

Description des courants induits

La démarche suivie pour décrire ces courants induits dans les tissus repose sur l'évaluation du champ présent dans les tissus, permettant, en tenant compte des propriétés (dimensions, conductivité des structures parcourues par les courants résultant de l'induction), d'évaluer leur intensité.

L'évaluation des champs à l'intérieur des tissus biologiques fait appel à deux étapes successives :

- la macrodosimétrie, qui décrit et quantifie le couplage entre le champ extérieur et les courants induits à l'intérieur du corps ;
- la microdosimétrie, qui décrit et quantifie le couplage entre ces champs présents à l'intérieur du corps et les courants qu'ils induisent dans les structures cellulaires et subcellulaires (par exemple la membrane).

Macrodosimétrie : évaluation du champ interne et des courants induits

Les paramètres des équations qui permettent d'évaluer les champs internes par rapport à des champs environnants externes sont essentiellement les conductivités dans l'air et les tissus. Les ordres de grandeur sont très différents (voir Tableau 9), par exemple 0,7 S/m pour le sang et $0,5 \cdot 10^{-4}$ à $1,7 \cdot 10^{-4}$ S/m pour l'air.

Tableau 9 : Conductivité de tissus biologiques (d'après [Gabriel et al., 1996] et [Foster, 2003])

Tissus biologiques	Conductivité (en Siemens / m)
Liquide céphalo-rachidien	2
Corps vitré	1,5
Sang	0,7
Dure-mère	0,5
Tissus oculaires (sclérotique)	0,5
Cornée	0,4
Cristallin (cortex)	0,3
Aorte	0,25
Cristallin (noyau)	0,2
Muscle	0,2
Cartilage	0,15
Cœur	0,05

Tissus biologiques	Conductivité (en Siemens / m)
Poumon (vide d'air)	0,03 - 0,2
Cerveau (substance blanche)	0,02
Foie	0,02
Os	0,02 - 0,07
Cerveau (matière grise)	0,02 - 0,04
Graisse	0,01 - 0,035
Moelle osseuse (infiltrée)	0,001 - 0,1
Nerf	0,006
Peau	0,0002
Pour comparaison :	
Cuivre	60 000
Air sec	$0,5 \cdot 10^{-4}$ à $1,7 \cdot 10^{-4}$

Champ électrique

Pour un champ alternatif de 60 Hz et de 1 kV/m, le champ induit dans une sphère est de 7 à 8 ordres de grandeurs plus faible que le champ externe, soit un champ de 0,01 à 0,1 mV/m ([Valberg *et al.*, 1997] ; [Foster, 2003]). Le courant traversant les tissus dans ces conditions est comparé à celui qui serait produit par une pile de 1,5 V connectée à un conducteur formé par 37 km de tissus corporels [Valberg *et al.*, 1997]. Pour un humain en station verticale, les pieds à terre, et placé dans un champ non perturbé de 10 kV/m, la densité de courant a été estimée à 190 et 250 nA/cm², respectivement pour le thorax et l'abdomen, à 550 nA/cm² au niveau du cou et à 200 nA/cm² dans les chevilles [Kaune et Philips, 1980].

Dans le cas d'un champ électrique statique, le champ interne dans les tissus est nul.

Champ magnétique

Les champs magnétiques alternatifs induisent des courants quantifiables par le champ électrique interne. Pour une sphère, prise comme « objet » de l'induction celui-ci est tangentiel et maximal à la périphérie. À 50 Hz, un champ de 1 µT induit un champ électrique de 20 µV/m dans une sphère de 15 cm [Foster, 2003]. Le champ induit dépend de la boucle de courant qui s'établit dans le tissu et donc de la dimension de la sphère. Si celle-ci est de petit diamètre, par exemple de 10 µm (ordre de grandeur de la taille d'une cellule), un champ externe de 0,1 mT induit à 60 Hz un champ électrique de 10^{-7} V/m [Valberg *et al.*, 1997].

Les champs *in situ* calculés d'après des modèles anatomiques réalistes (fantômes) sont de l'ordre de grandeur des données obtenues sur des sphères. Les modèles anatomiques permettent d'obtenir une meilleure précision.

Le champ magnétique statique est présent dans les matériaux et les tissus. Cependant, en absence de toute variation il n'induit pas de courant.

Tableau 10 : Densités de courant induits chez un humain par un champ magnétique de 60 Hz (d'après [Repacholi et Greenebaum, 1999] et [NRC,1997])

Exposition	Densité de courant ($\mu\text{A} / \text{m}^2$)	
	Moyenne	Maximale
0,2 μT , uniforme	0,56	4,2
500 kV, 1000 A, à 0,5 m	400	2 800
138 kV, 500 A, à 0,5 m	240	1 700
25 kV, 2000 A, à 0,5 m	83	600

Tableau 11 : Effets internes de l'application d'un champ électrique de 50/60 Hz (d'après [Valberg et al., 1997])

Champ externe	Champ E interne (V/m)	Site	Densité de courant interne (mA/m ²)	Champ membranaire (V/m)
E : 1 kV/m	4×10^{-8}	Cou	0,22	0,12
		Thorax	0,15	
		Cheville	6,8	

Tableau 12 : Effets internes de l'application d'un champ magnétique de 50/60 Hz (d'après [Valberg et al., 1997])

Champ externe	Site	Champ E induit (V/m)	Densité de courant interne (mA/m ²)	Champ membranaire (V/m)
H : 0,1 mT	Corps	$4,8 \times 10^{-3}$	1,2	14,4
	Cœur	1×10^{-3}	0,2	0,2
	Cellule	2×10^{-7}	0,01	0,01
	Canal	1×10^{-10}	-	-

En résumé, les données de la macrodosimétrie montrent que les courants induits dans l'organisme par des champs de 50 - 60 Hz sont :

- de l'ordre de 0,1 à 1 mV/m pour un champ externe de l'ordre du kV/m ;
- de l'ordre du $\mu\text{V}/\text{m}$ pour un champ magnétique de l'ordre du μT [Foster, 2003].

Microdosimétrie : évaluation des champs et courants auxquels sont soumises les structures cellulaires et subcellulaires

Les champs et courants présents dans l'organisme du fait de l'existence d'un champ externe se distribuent aux cellules et aux éléments subcellulaires. L'analyse des situations rencontrées à l'intérieur des tissus a reposé sur la distinction de deux modèles de cellules pouvant rendre compte de la diversité cellulaire : un modèle sphérique représentatif d'une cellule quelconque et un modèle de cellule très allongée représentatif des fibres musculaires ou des neurones. Les évaluations tiennent compte aussi de la différence marquée entre les conductivités de la membrane et du cytoplasme.

Dans une cellule sphérique, le champ électrique interne est plus faible de plusieurs ordres de grandeur que le champ extracellulaire. En revanche, le champ électrique induit dans la membrane est plus élevé que le champ extracellulaire d'un facteur évalué par le ratio entre le rayon cellulaire et l'épaisseur de la membrane, soit un ordre de grandeur de 10^3 .

Dans une cellule très allongée, modèle choisi pour représenter les neurones, l'évaluation intègre la notion de constante d'espace (désignée par Λ), déterminée par les caractéristiques de résistance membranaire. Cette constante d'espace est utile en neurobiologie pour situer l'influence d'un phénomène électrique endogène ou exogène sur l'activité d'un neurone, par exemple la possibilité de produire l'émission d'un potentiel d'action par un processus de sommation.

Ainsi, des champs de l'ordre de 1 mV/m dans le milieu entourant la cellule peuvent induire des potentiels de l'ordre de 10 nV dans une cellule sphérique de dimensions typiques, mais de plusieurs ordres de grandeur en plus dans des axones si ceux-ci sont parallèles au champ [Foster, 2003]. Ces données doivent être prises en compte à propos de l'excitation des membranes.

Actions produites par les courants induits

Effets thermiques

Les courants induits sont, en principe, susceptibles de produire par effet Joule un échauffement des tissus traversés. Il peut s'ensuivre des effets qualifiés de « thermiques », principaux mécanismes d'action des champs de fréquences très élevées. Cependant, dans le cas des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, l'énergie transmise à distance des conducteurs est extrêmement faible. Le nom de « rayonnement » donné fréquemment aux champs électromagnétiques est en grande partie injustifié dans ce cas, car, contrairement aux radiofréquences, les conducteurs de 50 - 60 Hz ne rayonnent que très peu d'énergie. Une ligne de transport de 500 MW rayonne moins de 20 μ W soit 20×10^{-12} % de l'énergie transportée. De ce fait, l'énergie disponible dans les objets situés à distance, notamment dans les tissus, est particulièrement faible et n'est pas susceptible d'entraîner un échauffement de ces derniers. Elle est évaluée à $1,3 \times 10^{-10}$ W/kg (voir Tableau 13) [Valberg *et al.*, 1997]. Qui plus est, la valeur de la longueur d'onde (5000 à 6000 km) ne permet pas à l'énergie transférée de se focaliser en un point particulier de l'organisme. L'élévation thermique qui pourrait en résulter dans le corps d'un sujet humain est estimée à $1,5 \cdot 10^{-8}$ °C par jour, pour des champs E de 1 kV/m et M de 0,1 mT, soit un ordre de grandeur de 1^{-10} fois l'énergie produite par le métabolisme [Valberg *et al.*, 1997]

Tableau 13 : Dépôt d'énergie dans un organisme humain par exposition à un champ électrique ou magnétique, comparé à son métabolisme basal (d'après [Valberg et al., 1997])

Champ externe	Dépôt d'énergie (W/kg)
$E : 1 \text{ kV/m}$	$5,7 \times 10^{-10}$
$H : 0,1 \text{ mT}$	$1,3 \times 10^{-10}$
Métabolisme de base	> 1,0 W/kg

Effets non thermiques

Que le champ externe soit électrique ou magnétique, il a comme conséquence de créer des courants qui circulent dans la périphérie du corps pour le champ électrique et dans sa totalité pour le champ magnétique. Les champs électriques internes induits sont susceptibles d'exercer des forces, et donc des effets de mobilisation (attraction, répulsion) ou de déformation sur des éléments chargés, tels que des ions ou des protéines. Ces dernières ont fait l'objet d'une grande attention car elles jouent des rôles fonctionnels de premier plan, en tant qu'enzymes, récepteurs et protéines canalaire (voir Tableau 14).

Tableau 14 : Forces exercées sur une particule de 0,2 µm du fait de champs E ou H de 50 / 60 Hz (d'après [Valberg et al., 1997])

Champ externe	Site	Force exercée par le champ E interne sur 10 charges (pN)	Force magnétique sur une particule de 0,2 µm (pN)
$E : 1 \text{ kV/m}$	Tissu	6×10^{-11}	-
	Membrane	2×10^{-7}	-
$H : 0,1 \text{ mT}$	Corps	$2,3 \times 10^{-5}$	2
	Cœur	$4,8 \times 10^{-6}$	-
	Cellule	1×10^{-9}	-

La possibilité pour le courant électrique de stimuler les tissus excitables (muscles, nerfs) est connue depuis le XIX^e siècle. Les acquis de la physiologie montrent que, dans les conditions normales, ces organes utilisent des phénomènes électriques qui leur sont propres pour assurer leur fonctionnement. L'étude de ces phénomènes électriques cellulaires a permis de les décrire, de les quantifier et d'en connaître les lois. Il est donc tout à fait logique de s'interroger sur les interactions des champs électriques et magnétiques de l'environnement avec les organes excitables qui tirent leur excitabilité de phénomènes électriques cellulaires. Dans ces organes excitables, l'excitation physiologique résulte de l'activité de dispositifs membranaires particuliers les canaux commandés par tension (*voltage gated channels*).

L'excitation d'une cellule nerveuse par un courant électrique est certes fonction de son intensité (avec un effet de seuil de type « tout ou rien »), mais aussi de paramètres tels que la durée d'application du stimulus ou, dans le cas d'un stimulus itératif, de sa fréquence de répétition. Ces notions sont décrites en physiologie sous les noms de :

- relation intensité/durée ;
- relation intensité/fréquence (qui comporte elle-même l'influence de la vitesse d'établissement du courant et d'une propriété de la cellule décrite sous le terme d'accommodation).

Il est établi de longue date que la réponse d'un nerf à des stimulations alternatives est la meilleure (excitabilité maximale) dans la partie basse de la gamme des fréquences EBF (moins de 100 Hz) [Laget, 1970] par le jeu des deux relations signalées plus haut (relations intensité/durée et intensité/fréquence). La modélisation mathématique de ces relations confirme ces données [Foster, 2003]. L'évaluation sur un effet de physiologie sensorielle pouvant donner lieu à quantification chez l'homme (le seuil d'apparition des phosphènes par exemple) permet de situer la fréquence optimale de réponse à 20 Hz [Taki *et al.*, 2003].

De tous les tissus, les éléments nerveux sont les plus réactifs à la stimulation électrique. L'action des courants induits est relayée au niveau cellulaire par les structures qui sont physiologiquement responsables de la production ou de la propagation de l'influx nerveux, les canaux ioniques activés par la tension (*voltage gated channels*). La stimulation de nerfs peut se produire si le champ électrique local est supérieur à 5 - 25 V/m.

Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs peuvent, au-dessus d'un certain seuil, déclencher la formation de potentiels d'action dans les neurones. Une densité de courant d'environ 10 - 20 A/m² est nécessaire pour induire des potentiels d'action. Pour des neurones de grande longueur, orientés parallèlement au vecteur de la densité de courant, des courants de plus de 1 - 2 A/m² sont nécessaires. À 50 - 60 Hz, il faut une exposition corporelle à environ 100 mT pour obtenir cette densité de courant. Un champ de 100 µT produit le millième de cette densité de courant liminaire [Valberg *et al.*, 1997].

L'effet d'excitation des éléments nerveux peut donner lieu à des effets biologiques, dont le plus évident est la perception du champ électrique et aux phénomènes décrits sous le nom de phosphènes. Ces phénomènes résultent de la stimulation de parties à la fois plus exposées et plus excitables du système nerveux.

Phosphènes

Les phosphènes sont des sensations visuelles induites par l'exposition de la tête à des champs électriques ou magnétiques. Outre les champs, ces impressions lumineuses peuvent être obtenues très facilement par une légère compression des globes oculaires. Cette sensation ne résulte pas de l'activation des photorécepteurs, cônes ou bâtonnets, mais des cellules ganglionnaires de la rétine. Les phosphènes sont aussi produits quand les globes oculaires sont placés dans un circuit électrique créant un courant intraoculaire.

Les phosphènes présentent des motifs d'intérêt multiples :

- ils sont l'effet biologique validé survenant au seuil le plus bas. Ce seuil est à un maximum de sensibilité à 20 Hz ;
- comme ils peuvent être produits aussi bien par une stimulation électrique que par une stimulation magnétique, ils ne dépendent manifestement pas d'un effet sur une cible particulière à l'un des types de champ mais, plus vraisemblablement, de l'effet de courants induits qui traversent les éléments sensibles (les cellules ganglionnaires) ;

- pour les deux types de stimulation (électrique et magnétique), il y a une correspondance satisfaisante des ordres de grandeur des valeurs d'intensité parcourant l'œil confirmant que l'effet biologique résulte bien du passage de courants induits [Taki *et al.*, 2003].

Les phosphènes sont l'effet biologique objectif obtenu avec les valeurs électriques les plus faibles. Ils sont pris en compte comme « effet » pouvant servir de référence permettant de définir le seuil séparant les valeurs sans effet des valeurs produisant un effet objectivable. À la fréquence pour laquelle l'excitabilité est maximale, le seuil pour une stimulation magnétique est de 10 mT. Le champ induit dans la rétine est estimé alors à 0,05 V/m et, pour une stimulation électrique directe (électrode cornéenne), à 0,2 V/m à 25 Hz.

Il a été suggéré que les lignes de courant sont plus intenses dans une région proche du nerf optique.

Un autre exemple de stimulation d'un appareil sensoriel est connu. Dans le domaine des radiofréquences, on sait depuis l'utilisation des radars que des générateurs puissants peuvent donner lieu à des perceptions auditives (le « clic » du radar). Ceci n'a pas été décrit dans le domaine des champs extrêmement basses fréquences.

Perception du champ électrique

Le champ électrique ne pénètre que très peu les organismes mais il induit des courants à la surface du corps, dans le tissu très richement innervé qu'est la peau. La perception tactile qui en résulte est le principal effet biologique du champ électrique. Elle est démontrée chez l'homme, chez l'animal et elle est susceptible d'induire des modifications comportementales.

- Perception des champs électriques de très faibles valeurs

Il existe dans certains groupes d'animaux, surtout chez les vertébrés inférieurs, des récepteurs spécialisés pour détecter des champs E de très faible valeur. Ces dispositifs ont un caractère adaptatif évident ; ils concernent soit la recherche de nourriture, soit les relations entre individus, soit enfin l'orientation au cours de migrations. Ces récepteurs sont trouvés surtout chez les poissons sélaciens (élastomobranques, poissons cartilagineux, tels que requins et raies), chez certains poissons téléostéens (poissons osseux), chez certains amphibiens et chez l'ornithorynque. Les récepteurs sont des structures spécialisées, dites ampoules de Lorenzini, qui permettent de détecter des tensions de faible niveau. On les trouve soit sur la ligne latérale, soit en région buccale, ou, quand il existe, dans le rostre. Chez l'ornithorynque, ils sont présents dans le bec. Des études ont été faites avec les poissons capables de trouver une proie sans la voir. Un *Pleuronectes* (plie, carrelet) enfoui dans le sable peut être trahi par le champ électrique produit par la musculature qui assure sa respiration branchiale, alors qu'il n'est pas visible [Kalmjin, 1966]. Le poisson rat (*ratfish*, *Hydrolagus colliei*) présente une sensibilité électrique considérable, qui lui permet de percevoir des champs de l'ordre du $\mu\text{V/m}$. Il est possible de conditionner ces animaux à réagir à la perception de courants électriques de faible intensité (1 à 10 μA). Le seuil de perception du champ a été évalué chez eux à environ 0,2 $\mu\text{V/m}$, soit une sensibilité 1 000 à 10 000 fois plus grande que chez des poissons non pourvus d'électrosensibilité [Fields et Lange, 1980]. Des études ont aussi été faites avec le chien de mer en eau peu profonde ou avec le requin bleu à 40 m de profondeur. Les intensités induites dans les récepteurs ont été estimées à moins de 10 μA [Kalmjin, 1982].

L'extrême sensibilité des espèces évoquées à des signaux électriques de très faible valeur résulte de la présence dans leur organisme de dispositifs adaptatifs complexes comprenant des

récepteurs hautement spécialisés et réalisant dès l'étape de la transduction une amplification du signal capté en milieu aquatique. Ce signal est, de plus, intégré par des réseaux neuronaux particuliers.

- Perception du champ électrique chez l'animal

L'implication des récepteurs cutanés et leur mode de stimulation par le champ électrique ont été soumis à une analyse expérimentale chez le chat dont une patte est placée dans le champ créé par une paire d'électrodes situées à grande proximité de telle sorte que la valeur locale du champ puisse atteindre des niveaux très élevés (600 kV/m). En même temps, l'activité des récepteurs est suivie par enregistrement unitaire de fibres isolées dans les racines dorsales de la région lombosacrée. Le travail a conduit à mettre en évidence la réponse de certains types de récepteurs d'adaptation rapide. L'élimination du pelage réduit la réponse, sans totalement l'éliminer. Le champ électrique apparaît agir, de ce fait et sans doute partiellement, par mobilisation des poils, mais aussi par une activation directe sur des récepteurs du follicule pileux [Weigel *et al.*, 1987]. Des interactions directes sur la protéine canalaire sont vraisemblablement en cause.

- Perception du champ électrique chez l'homme

Dans les conditions d'essais à l'aveugle, des volontaires ont été placés dans des champs électriques de force variable et la relation entre la valeur du champ électrique et le seuil de perception a été établi. Le seuil est variable selon les individus et selon la position corporelle : 5 % des sujets perçoivent le champ de 50 Hz à 5 kV/m et, à l'opposé, 40 % ne ressentent rien à 27 kV/m [Cabanès et Gary, 1981]. D'autres études ont cherché à valider les valeurs de seuil et à tester l'influence possible de la pilosité sur la perception du champ électrique. Une étude japonaise [Kato *et al.*, 1989] a conduit à situer le seuil de perception à 30 – 65 kV/m pour la peau velue du dos de la main et à 115 kV/m pour la peau glabre de la paume. L'observation de valeurs aussi élevées a été attribuée aux conditions de température et de faible hygrométrie (la perception des champs est plus facile par temps humide).

En résumé, il existe une perception du champ électrique, présentant un effet de seuil, assez comparable chez l'homme et chez les animaux, qui apparaît pour des valeurs dont l'ordre de grandeur se situe dans la gamme de 5 à 10 kV/m. L'exposition au champ magnétique, en revanche, ne produit pas d'effet de perception.

Modifications comportementales induites par la perception du champ électrique

Le fait que le champ électrique puisse être perçu à partir de niveaux élevés d'intensité est largement vérifié par l'étude du comportement des animaux quand ils sont laissés en situation libre dans le champ électrique. Des études ont été faites avec diverses espèces (rongeurs de laboratoire, porcs, primates...). Seules seront évoquées ici les études sur rongeurs, du fait que les travaux réalisés avec les autres espèces ne font que les confirmer. Des rats ont été entraînés à donner une réponse (pression d'un levier) lors de l'application d'un champ 60 Hz d'intensité variable. Plusieurs réponses correctes étaient suivies d'une récompense (une ration de nourriture). Les réponses ont montré une perception débutant, selon les animaux, entre 4 et 10 kV/m, la totalité des animaux répondant dans la gamme de 10 et 30 kV/m [Stern *et al.*, 1983]. Ces valeurs concordent de manière très satisfaisante avec la description de la perception faite chez l'homme. Par la même démarche, il n'a pas été mis en évidence de différence de sensibilité entre mâles et femelles chez le rat [Stern et Laties, 1985]. Dans une autre expérimentation reposant sur un conditionnement similaire par distribution d'aliment, le seuil de perception évalué par deux

protocoles expérimentaux différents a été estimé selon le cas à 7,9 et 13,3 kV/m [Sagan *et al.*, 1987].

Une autre approche, visant plus à juger du caractère aversif ou désagréable de la sensation perçue qu'à déterminer son seuil, a reposé sur une démarche de libre choix dans laquelle les rats pouvaient à volonté être dans un compartiment exposé ou dans un compartiment isolé des champs. Aucune différence significative n'est observée pour des intensités de 60 ou 75 kV/m, tandis qu'un évitement apparaît pour 90 kV/m [Hjeresen *et al.*, 1980].

Le degré de désagrément produit par l'exposition au champ a été évalué chez le rat par comparaison avec un autre facteur possiblement aversif (méthode du double choix). Le facteur aversif était l'éclairement par une ampoule de 75 watts. Les rats pouvaient appliquer ou arrêter l'un ou l'autre de ces deux stimuli (champ électrique ou lumière). Il n'y a pas eu de réponse indiquant une aversion pour le champ électrique à des valeurs de 90 ou de 100 kV/m, tandis que l'éclairement était arrêté de manière significative, indiquant qu'il était bien ressenti comme aversif [Stern et Laties, 1989].

Mécanismes directs impliquant une cible

Les possibilités pour des champs électromagnétiques d'interagir avec la matière vivante par un moyen direct, c'est-à-dire ne mettant pas en jeu des courants induits, impliquent la présence dans les tissus de structures sensibles à ces champs. Il s'agit de cibles, pouvant jouer le rôle de transducteurs. Dans les faits, ce mode d'action « direct » concerne exclusivement le champ magnétique.

Le champ électrique pénètre peu les tissus et on lui connaît peu d'éléments récepteurs spécifiques. Un exemple est donné par les plaques olfactives de certains insectes (abeilles) [Erickson, 1982]. Ces plaques qui se comportent comme des électrets ont fait l'objet d'hypothèses relatives à la perception des odeurs. De tels dispositifs ne sont pas retrouvés chez les vertébrés.

L'action directe des champs sur les tissus concerne donc essentiellement le champ magnétique pour lequel deux types de cibles ont été identifiées, la magnétite, élément subcellulaire pouvant se comporter comme une aiguille aimantée, et des molécules ou particules produites par certaines réactions chimiques dites, en fonction de leurs propriétés et de leur devenir, des « radicaux libres ». Ces deux catégories de cibles, de tailles très différentes selon qu'il s'agit d'organelles ou de molécules, ont été impliquées comme transducteurs dans des mécanismes de perception des champs magnétiques jouant un rôle fonctionnel pour les animaux qui en sont dotés. En l'état actuel des connaissances, cette magnétoréception ne concerne que la possibilité pour les animaux de percevoir le champ magnétique terrestre (ou champ géomagnétique). La différence d'échelle et la nature des mécanismes justifie de distinguer magnétoréception physique et magnétoréception chimique.

Magnétoréception physique

L'intérêt pour la magnétite a commencé avec l'étude des bactéries magnétotactiques ([Blackmore, 1975] ; [Franckel et Blackmore, 1989]). Ces bactéries flagellées des milieux aquatiques se déplacent en suivant la direction du vecteur du champ géomagnétique. Elles contiennent une chaîne de cristaux de magnétite qui les conduit à se comporter comme l'aiguille de la boussole. Le mécanisme d'orientation est donc ici purement passif, il consiste à placer le corps bactérien dans une direction qui suit le vecteur champ, du fait de l'existence de mécanismes propres de propulsion (cils) ; il n'y a pas à proprement parler d'interaction biologique du champ avec la bactérie.

Cependant, des considérations purement physiques tendent à crédibiliser le fait que, dans l'organisme d'animaux supérieurs, la magnétite puisse être à l'origine d'une transduction (conversion d'une information de nature physico-chimique en message nerveux). Placée dans un champ de 100 μT (valeur approximativement double de celle du champ géomagnétique), le couple de rotation produit sur une particule de magnétite (1 pN) est d'un ordre de grandeur susceptible d'exercer des modifications mécaniques sur certaines organelles. Par exemple une force d'1 pN peut mobiliser un cil de l'oreille interne [Valberg *et al.*, 1997].

De la magnétite a été trouvée dans divers tissus animaux et humains. Elle se présente souvent sous forme de cristaux rappelant ceux des bactéries magnétotactiques, comme celle décrite dans le tissu cérébral humain. Elle peut prendre l'allure de structures lamellaires [Fleissner *et al.*, 2003] ou constituer avec d'autres composés à base de fer (ferritine) des éléments complexes susceptibles de se déformer (contractions) sous l'influence du champ géomagnétique [Hsu *et al.*, 2007].

Les descriptions chez l'animal de cristaux dans la muqueuse olfactive (saumon, truite) associées à la validation de l'existence chez ces animaux d'une magnétoréception par des expériences comportementales et par l'enregistrement de potentiels évoqués, confirment cette interaction champ/tissus, même si la nature intime du processus de transduction reste encore à établir. Un bilan similaire peut être dressé chez certains oiseaux chez lesquels des grains de magnétite ont été mis en évidence à la base du bec et, chez le pigeon, dans le tissu développé à ce niveau, la caroncule. Les expériences de réponse conditionnée chez le pigeon [Mora *et al.*, 2004] et l'enregistrement des potentiels évoqués dans le nerf ophtalmique supérieur et dans le ganglion du trijumeau chez le bruant des prés, *Passerculus sandwichensis*, un migrateur nord-américain [Lohmann et Johnsen, 2000], constituent autant d'arguments solides pour valider ce type d'interaction. Dans un certain nombre de ces travaux, ces faits ont reçu une confirmation par des expériences de dénervation.

Il est ainsi évident, en l'état actuel des connaissances, que la magnétite est l'agent de la transduction du champ géomagnétique dans certaines fonctions trouvées dans le règne animal. Sa présence chez l'abeille, connue de longue date, est validée par des études de comportement montrant la grande sensibilité au champ géomagnétique et la baisse très rapide de la réponse lorsque la fréquence augmente. Le seuil de sensibilité à un champ statique se situe à 0,26 μT mais la réponse en fréquence diminuant très rapidement lorsque le champ est alternatif (le seuil est près de 500 μT en 50 Hz) [Kirschvink *et al.*, 1997]. Les progrès de la connaissance de la structure des transducteurs et de leur relation avec le cytosquelette des cellules qui les contiennent (œnocytes) sont cohérents avec la différence de réponse selon la fréquence [Hsu *et al.*, 2007].

La mise en évidence de cristaux de magnétite dans le cerveau de l'homme [Kirschvink *et al.*, 1992] n'a pas donné lieu à l'identification d'une fonction physiologique associée et parallèlement, les allégations d'une action de ces cristaux comme étape initiale d'un effet sanitaire induit par les champs de l'environnement n'ont pas, non plus, été établies.

La présence de magnétite n'est pas, en elle-même, l'indication absolue de sa participation à une action biologique et rien ne justifie d'associer de manière systématique sa présence à un effet sanitaire. La présence de cristaux indépendants de toute structure intracellulaire ou de terminaisons nerveuses ne permet pas de leur inférer, sans autre preuve, une quelconque fonction physiologique.

Magnétoréception chimique

Le fait que des radicaux libres puissent être les agents d'interaction de champs magnétiques avec l'organisme implique qu'une réaction chimique initiale clive une molécule en éléments de charges opposées dont le réassemblage peut être différé sous l'influence d'un champ magnétique environnant. Au cours de leur vie prolongée par l'action du champ magnétique, ces radicaux libres peuvent, selon leur réactivité, se fixer sur différents substrats et les modifier. Ainsi pourraient se trouver produits des effets physiologiques ou pathologiques, y compris des effets de lésion de macromolécules (protéines ou acides nucléiques). Le caractère plausible d'un tel mécanisme reste cependant très dépendant de considérations d'ordre énergétique. Certes, une action sur des macromolécules ne résulterait pas d'un effet direct (effet ionisant, impossible à obtenir avec des champs extrêmement basses fréquences) mais des radicaux formés par une action autre que celle des champs pourraient, sous leur action, exercer des effets sur d'autres molécules. Cette éventualité a reçu des arguments de deux types : d'une part le fait que des réactions chimiques peuvent être modifiées par un champ magnétique et d'autre part la découverte de molécules particulières, les cryptochromes, reconnues maintenant comme les agents d'un processus physiologique radicalaire de magnétoréception impliqué comme moyen d'orientation chez certains oiseaux migrateurs.

Mise en évidence d'actions de champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences par un mécanisme radicalaire

Actions radicalaires *in vitro*

Il a été montré que le cours de réactions chimiques impliquant des paires radicalaires dépend de l'existence et de l'orientation des spins nucléaires³¹ de ces paires. L'influence du spin nucléaire est maximale lorsque la paire radicalaire est confinée dans un espace limité (cage) qui permet un certain degré d'indépendance aux deux partenaires mais favorise aussi leur réassemblage dans une période qui permet aux spins nucléaires d'agir sur les spins impairs des électrons de la paire radicalaire [Turro, 1983]. Ces radicaux libres sont sensibles à un champ magnétique. De plus, des réactions chimiques *in vitro*, dans lesquelles un processus radicalaire est en cause, sont influencées par un champ magnétique externe ([Steiner et Ulrich, 1989] ; [Brocklehurst et McLauchlan, 1996]). Les champs magnétiques qui doivent être appliqués pour obtenir des modifications de réactions chimiques *in vitro* sont de valeurs relativement élevées (20 μ T à 20 mT) [Walleczek, 1995].

Les radicaux libres étant par nature polarisés, on peut prévoir, *a priori*, qu'une réaction radicalaire puisse être modifiée en présence d'un champ statique mais, dans un champ alternatif, on pourrait penser que la trajectoire parcourue par un radical dans la première moitié d'une alternance soit annulée lors de la seconde et que le champ magnétique n'ait pas pu produire d'effet. Cette proposition hypothétique ne se trouverait confirmée que si le radical n'a pas rencontré de cible et n'a pas exercé d'effet au cours des deux parties de l'alternance. La valeur relative du temps nécessaire à ce qu'une action apparaisse, par rapport à la durée d'une alternance, est de ce fait un paramètre déterminant. Pour des champs magnétiques extrêmement basses fréquences, il a été montré *in vitro* (sur système micellaire), que le résultat est le même qu'avec un champ statique [Scaiano et al., 1994].

Parmi les substrats d'intérêt biologique pouvant donner lieu à la formation de paires radicalaires et pouvant être testés *in vitro*, l'attention s'est portée sur certaines enzymes telles que des enzymes

³¹ Moment cinétique intrinsèque du noyau d'un atome

dépendantes d'un coenzyme à groupement métallique. Sur un modèle, dans lequel l'activité enzymatique dépend de la vitamine B12, l'exposition d'enzymes d'origine humaine ou bactérienne à des champs de 0,50 et 100 mT montre un effet du champ magnétique de l'ordre de 15 % au maximum de l'action [Taoka *et al.*, 1997].

Actions radicalaires *in vivo*

Les réactions radicalaires sont nombreuses en biologie. Elles sont communes, par exemple, chez les végétaux (photosynthèse). Pour cette raison, l'hypothèse a été faite qu'un mécanisme d'interaction entre les champs et la matière vivante pourrait s'exercer par une action d'un champ magnétique sur des radicaux libres. L'influence d'un champ électrique est peu probable, du fait de la faible pénétration dans l'organisme. Au regard des effets biologiques possibles des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, l'intérêt du mécanisme radicalaire tient à un autre motif : du point de vue de la physique théorique, la faible énergie portée par les champs extrêmement basses fréquences les exclut des effets biologiques produits par les champs de haute énergie que sont les rayonnements ionisants. Il est cependant concevable que des effets biologiques puissent résulter, même avec une énergie inférieure au bruit de fond thermique, d'un processus de radicaux libres, à condition que les paires radicalaires aient été préalablement constituées. Il existe dans l'organisme des fonctions physiologiques ou des situations pathologiques au cours desquelles des radicaux libres apparaissent. Cette formation, énergétiquement exigeante est produite par des réactions chimiques qui ne dépendent pas du champ magnétique pour séparer les partenaires de la paire radicalaire.

Ainsi, une fois formés et à condition que leur durée de vie leur permette de diffuser et de toucher d'autres substrats, ces radicaux pourraient exercer des effets physiologiques et dès lors, il n'est pas inconcevable qu'ils pourraient léser des macromolécules, telles que des protéines, des lipides (par peroxydation), les lipides membranaires par exemple, et éventuellement des acides nucléiques. De telles actions supposent que se trouvent réunies de nombreuses conditions, en particulier du point de vue de la biochimie cellulaire.

Des études expérimentales ont eu comme objectif de tester l'influence des champs électromagnétiques sur des processus radicalaires au sein de la matière vivante, en utilisant des modèles variés (cellules végétales ou animales isolées, homogénats tissulaires, animaux entiers) et des champs de caractéristiques de fréquence ou forme différentes (champs statiques, sinusoïdaux, pulsés) et de forces assez diverses (de quelques μT à 1 T). Il est difficile de tirer des conclusions très nettes de travaux aussi hétérogènes. Néanmoins, la tendance qui se dégage est que, pour des champs de 50 - 60 Hz, des effets ont été décrits à partir des valeurs de champ de quelques dizaines de μT et pour les valeurs plus élevées. On retiendra, par exemple une étude sur lymphocytes isolés de rats, dans laquelle l'effet d'un champ de 40 μT parallèle au champ géomagnétique a été constaté, alors que d'autres expositions à des valeurs plus élevées sont restées sans effet [Zmyslony *et al.*, 2004]. En champ statique, les modèles qui ont conduit à des résultats en accord avec l'hypothèse radicalaire utilisaient des lymphocytes isolés de rats ([Jaite *et al.*, 2002], sous 7 mT), des cellules de la lignée HL-60 ([Ishisaka *et al.*, 2000], sous 60 à 200 mT), des cellules isolées de tabac ([Sahebamei *et al.*, 2007], de 10 et 30 mT). Des chlorelles (algues unicellulaires) ont présenté une modification des systèmes antioxydants et une croissance accrue par exposition à des champs statiques de 10 à 35 mT [Wang *et al.*, 2008]. L'exposition d'hématies de lapin à des champs de 0,2 et 0,5 mT n'exerce pas d'effet délétère sur les cellules intactes. En revanche, si celles-ci ont été lésées par un processus oxydatif (action d'une préparation de fer bivalent et d'ascorbate), l'exposition au champ de 0,5 mT potentialise les lésions cellulaires [Fiorani *et al.*, 1997].

Les champs magnétiques extrêmement basses fréquences apparaissent ainsi susceptibles de produire des actions par des mécanismes radicalaires, sous réserve de réunir quelques conditions déterminantes : qu'il existe des radicaux libres, car les champs de basses fréquences ne sont pas capables de les former et que la force du champ soit suffisante, ce qui situe le domaine d'action probablement plus dans la gamme des milliteslas (mT) que des microteslas (μ T).

Une fonction physiologique validée reposant sur un mécanisme radicalaire

La connaissance des mécanismes d'interaction entre champ magnétique et organismes animaux a progressé de manière considérable par l'étude des moyens d'orientation chez les animaux, principalement de l'orientation migratoire chez les oiseaux. Dans ce cas particulier, des hypothèses ne reposant que sur des considérations théoriques avaient suggéré que la reconnaissance de la direction du champ magnétique terrestre ne puisse se dérouler que dans un tissu particulier, la rétine, et que le mécanisme intime de transduction soit radicalaire. La découverte de photopigments particuliers chez les végétaux, les cryptochromes (Cry-), reconnus très rapidement comme des intermédiaires dans le processus d'intégration de la photopériode par les plantes, a conduit à rechercher ces molécules chez les animaux et chez l'homme. Ces photopigments sont des protéines complexes, porteuses de deux groupements actifs, une ptérine et une flavine. Ils sont hautement conservés dans tout le monde vivant ; chez les animaux ils sont localisés aux cellules ganglionnaires de la rétine. Leur expression est variable selon la situation physiologique : chez un migrateur nocturne (*Sylvia borin*) il a été montré que l'expression du Cry-1 est très marquée la nuit en période de migration [Mouritsen *et al.*, 2005]. Le mécanisme de la transduction du champ magnétique repose sur une activation préalable du photopigment par un rayonnement lumineux de faible longueur d'onde (bleue à proche des ultra-violets) conduisant à une forme active, de nature radicalaire. Celle-ci est sensible au champ magnétique terrestre et par des mécanismes rétinien, non élucidés pour l'instant, permet à l'oiseau de « voir » le champ magnétique terrestre. La structure des Cry-, dont la protéine contient un domaine comportant trois tryptophanes permet le transfert d'électrons produits sous l'action de la lumière.

La nature de la forme active a été l'objet d'hypothèses reposant sur une activation du radical flavine et dont la dernière, reposant sur une détermination expérimentale, proposait que ce soit l'anion FADH⁻ [Hoang *et al.*, 2008]. Plus récemment, cependant, l'hypothèse a été faite que l'élément actif pourrait être l'ion superoxyde, avec une argumentation fondée sur une simulation *in silico* [Solov'yov et Schulten, 2009]. Il est important de savoir si cette hypothèse sera confirmée *in vivo*.

Tous les travaux portant sur les mécanismes radicalaires ne permettent pas, pour l'instant, d'apporter de réponse à la question des effets biologiques (autres que l'orientation des oiseaux migrants) et encore moins de trancher la question des effets sanitaires. Il est difficile, aussi, de concilier des données pour l'essentiel hypothétiques avec des faits expérimentaux tels que les expositions à long terme d'animaux de laboratoire qui n'aboutissent pas à mettre en évidence d'effets pathogènes (des rats Fischer des deux sexes ont été exposés pendant deux ans à 0,5 et 5 mT sans qu'il soit noté d'effets sur la morbidité et la mortalité [Yasui *et al.*, 1997]. Du fait de son caractère plausible, l'hypothèse radicalaire mérite que des études multidisciplinaires soient poursuivies.

Annexe 5 : Appareils de mesure du champ magnétique

L'appareil Enertech Emdex II

L'Emdex II a été étudié très en détail à Supélec, entre 2005 et 2006 et a été comparé à d'autres types d'appareils de mesures du champ magnétique très basses fréquences (*Emdex Lite*, *Combinova*, *Maschek*, etc.). Il a été jugé comme le plus approprié pour des mesures d'exposition des personnes, à la fois au plan métrologique, au plan pratique de sa mise en œuvre et pour ses possibilités de stockage et de restitutions des données enregistrées. Le constructeur fournit un logiciel d'exploitation des données « Emcalc 2007 » [ENERTECH, 2007], données qui sont aussi exportables sous Microsoft Excel ou sous Matlab.

Ses inconvénients sont principalement son poids d'environ 350 g, son encombrement un peu plus important que l'*Emdex Lite*, qui peut poser problème dans le cas où des enfants seraient amenés à porter l'appareil sur eux et enfin son prix unitaire de plus de 2 000 euros HT. La Figure 7 montre l'appareil Emdex II.

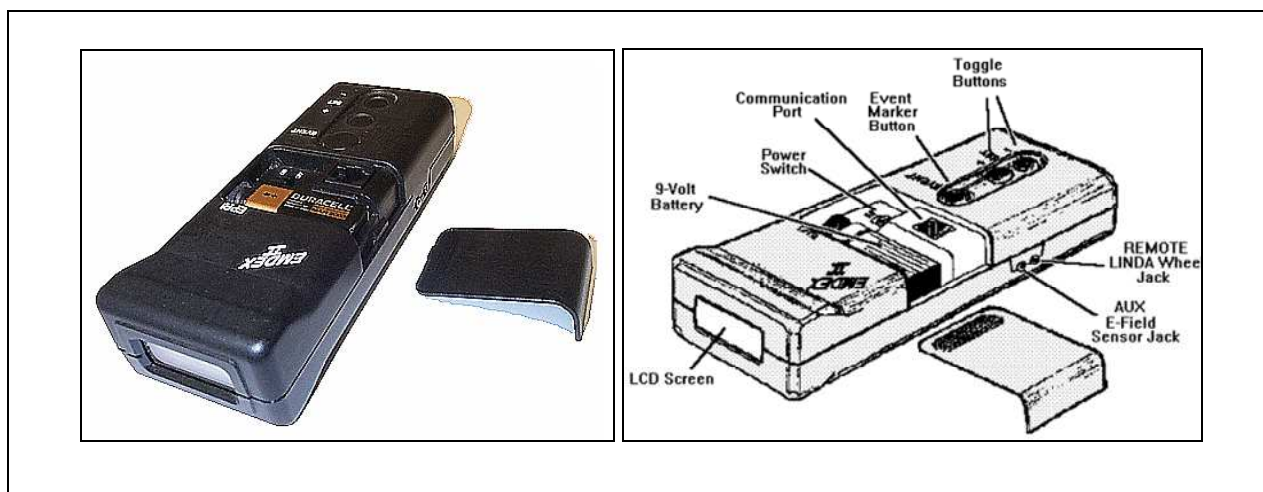


Figure 7 : Photo et vue éclatée de l'Emdex II

Principe de la mesure

L'appareil est constitué de trois bobines de référence identiques placées perpendiculairement selon un trièdre trirectangle et à l'opposé de l'écran LCD. Le champ magnétique résultant B_t est donc la racine carrée de la somme des carrés des champs magnétiques en x, y et z selon la formule :

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Mise en œuvre de l'Emdex II

À l'allumage, l'appareil indique le niveau de la batterie. Puis il se positionne en mode STANDBY (attente). A partir de là, les touches « + » et « - » permettent d'évoluer dans les menus et la touche EVENT permet de valider.

ATTENTION : les données stockées dans la mémoire de l'appareil ainsi que tous les réglages sont réinitialisés si l'appareil est éteint. Il faut donc veiller à récupérer les mesures avant d'éteindre celui-ci.

Tableau 15 : Caractéristiques principales de l'Emdex-II

Bande de fréquences couvertes	40 – 800 Hz
Dynamique de mesure	0,01 – 300 μ T
Résolution	0,01 μ T +/- 1 %



Figure 8 : Emdex II

Exemple de restitution d'enregistrement

La Figure 9 représente un graphique issu du logiciel *Emcalc* montant l'exposition au champ magnétique extrêmement basses fréquences au cours d'un enregistrement sur 24 heures environ d'une personne portant l'appareil sur lui. Cet enregistrement, pour être significatif, doit être associé à un emploi du temps afin de pouvoir relier autant que possible les niveaux d'exposition à l'environnement de la personne (travail sur ordinateur ou sur un équipement électrique, trajet en voiture ou en transport en commun, domicile, etc.)

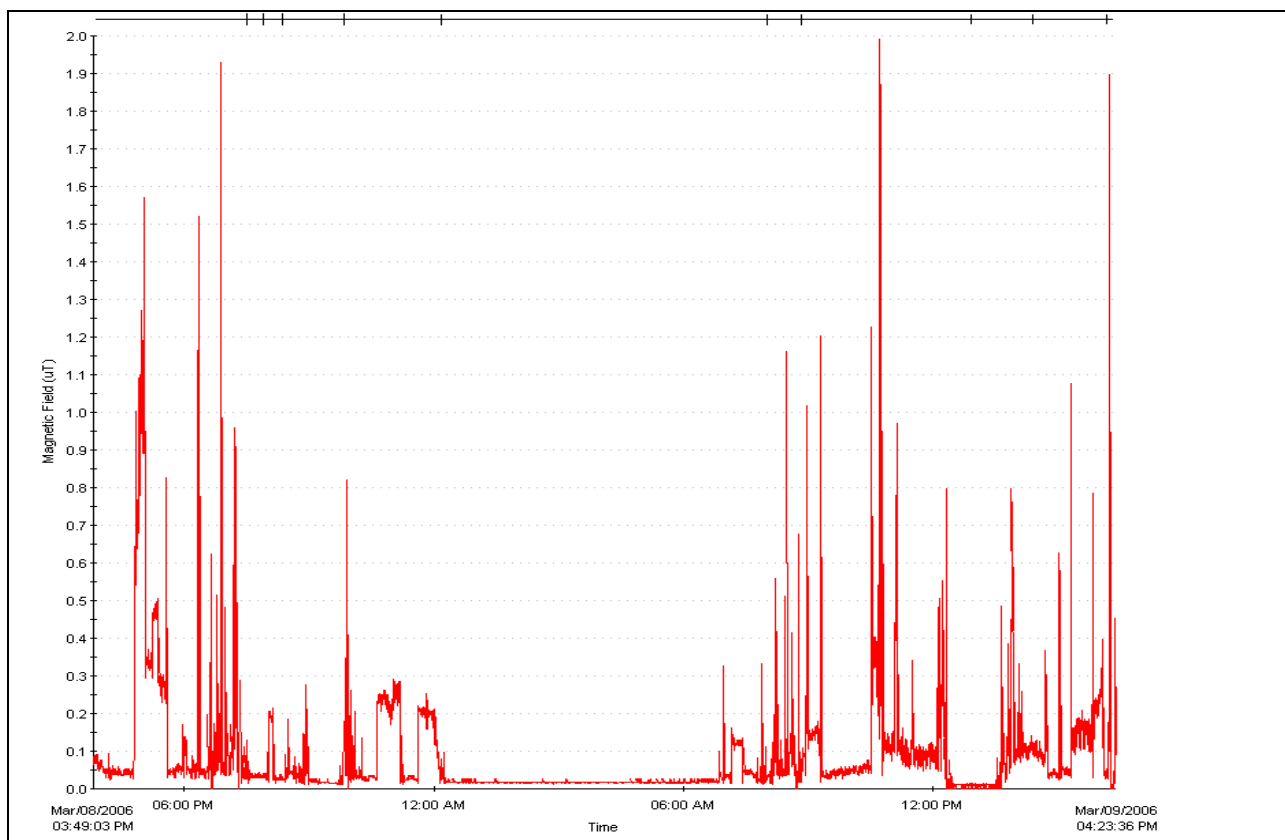


Figure 9 : Restitution graphique des données enregistrées sur 24 heures environ avec le logiciel Emcalc

NARDA EFA-300

Le NARDA EFA-300 peut effectuer des mesures de champ magnétique et électrique dans la bande de fréquences de 5 Hz à 32 kHz. Pour effectuer ces mesures, l'appareil est composé principalement de deux parties ou unités élémentaires :

- *Basic Unit* (unité élémentaire) : cette unité possède un capteur intégré lui permettant d'effectuer des mesures de champ magnétique, de manière isotrope ou selon un certain axe, avec une précision de 6 % (Figure 10) ;
- le capteur de mesure du champ électrique (Figure 11).

Ce capteur ressemble à un cube et consiste en trois paires orthogonales de plaques (électrodes) qui servent à mesurer le courant diélectrique induit par le champ électrique. Ce courant est donc proportionnel au champ électrique. À faible distance cependant, typiquement 5 cm, la mesure n'est pas très précise compte tenu de la taille du capteur dont le côté est de l'ordre d'une dizaine de cm.

Pour la mesure, on s'est attaché à prendre un plan de référence correspondant à la face avant du capteur ; ceci peut augmenter l'incertitude sur la valeur du champ électrique à faible distance, c'est pourquoi de façon générale, on suggère de ne pas utiliser les appareils de mesure à moins de 10 cm. La valeur indiquée à 5 cm donne cependant un ordre de grandeur acceptable qui permet de bien montrer la tendance à la décroissance du champ.



Figure 10 : EFA 300 Basic Unit



Figure 11 : EFA 300 capteur de champ électrique

Les instruments de la plate-forme

La plate-forme métrologique de Supélec a été constituée partiellement depuis décembre 2006. Elle est basée sur la mise en œuvre de bobines de Helmholtz permettant d'assurer entre les bobines et en particulier dans l'axe des deux bobines un champ (en toute rigueur, une induction) magnétique extrêmement basses fréquences bien défini et dont l'amplitude est reliée simplement au courant circulant dans les deux bobines par l'équation suivante :

$$B = \frac{\mu_0}{2} N.I.R^2 \left(\frac{1}{(R^2 + x^2)^{1,5}} + \frac{1}{(R^2 + (R-x)^2)^{1,5}} \right)$$

où R est le rayon de chaque bobine, N le nombre de spires de chaque bobine (les deux bobines doivent être identiques), x la distance du point de mesure à l'une des deux bobines prise comme référence et I le courant circulant dans les bobines. L'écartement entre les deux bobines est égal au rayon R d'une bobine. Pour mémoire, $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$.

On prend généralement $x = R / 2$, ce qui simplifie fortement l'expression de B et la réduit à :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot 0.716}{R} N.I$$

avec B en teslas, I en ampères et R en mètres.

Le matériel de mesure déjà acquis pour cette plate-forme est le suivant :

- un autotransformateur secteur ;
- un milliampèremètre Agilent Technologies 34405A ;
- un appareil Enertech Emdex II de référence ;
- un jeu de Bobines de Helmholtz de marque Leybold (Figure 12).



Spécifications des bobines de Helmholtz	Marque Leybold
Nombre de tours N	130 dans chaque bobine
Rayon de la bobine R	155 mm (à qq mm près)
Distance entre bobines D	155 mm (à qq mm près)
Courant maximum à ne pas dépasser $I_{\max}$	2

Figure 12 : Bobines de Helmholtz

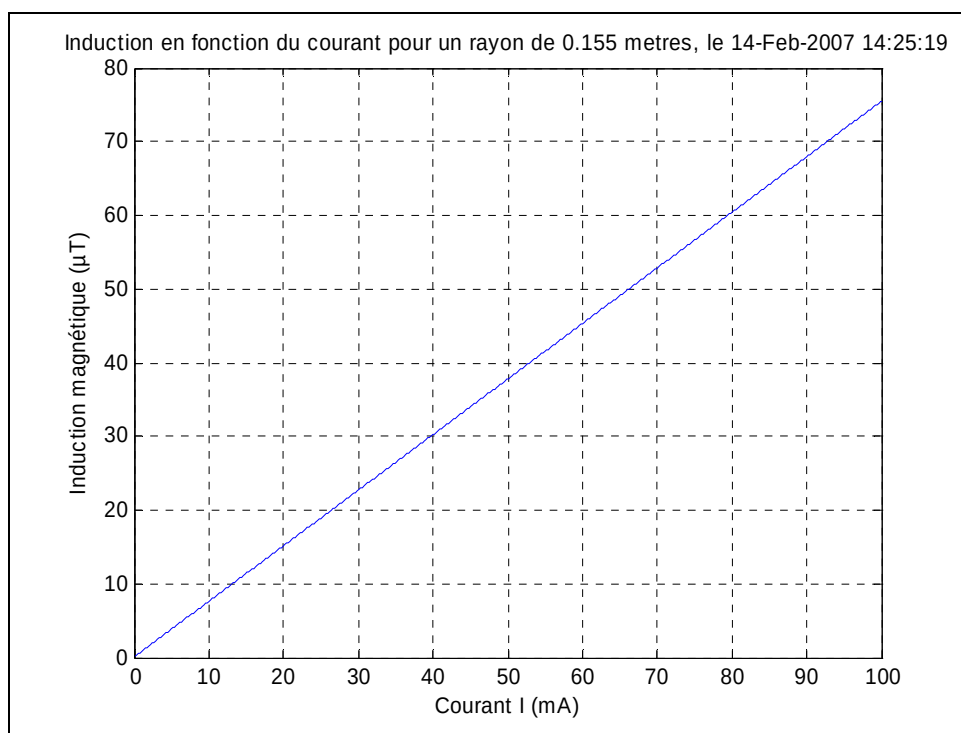


Figure 13 : Relation théorique entre le courant circulant dans les bobines de Helmholtz et l'induction créée sur l'axe au milieu des deux bobines

Protocole d'étalonnage des appareils de mesure Emdex II

Un protocole d'étalonnage des appareils de mesure *Emdex II* a été mis au point pour pouvoir garantir la fiabilité et la reproductibilité des mesures de champ magnétique à l'aide des appareils *Emdex II*.

Il est impératif de placer les bobines de Helmholtz et l'ensemble de la chaîne de mesure en un lieu où l'induction magnétique est la plus faible possible (typiquement inférieure 0,05 T) afin de pouvoir étalonner les appareils pour les plus bas niveaux possibles. On relèvera systématiquement le niveau ambiant indiqué par un *Emdex II* de référence au point de mesure.

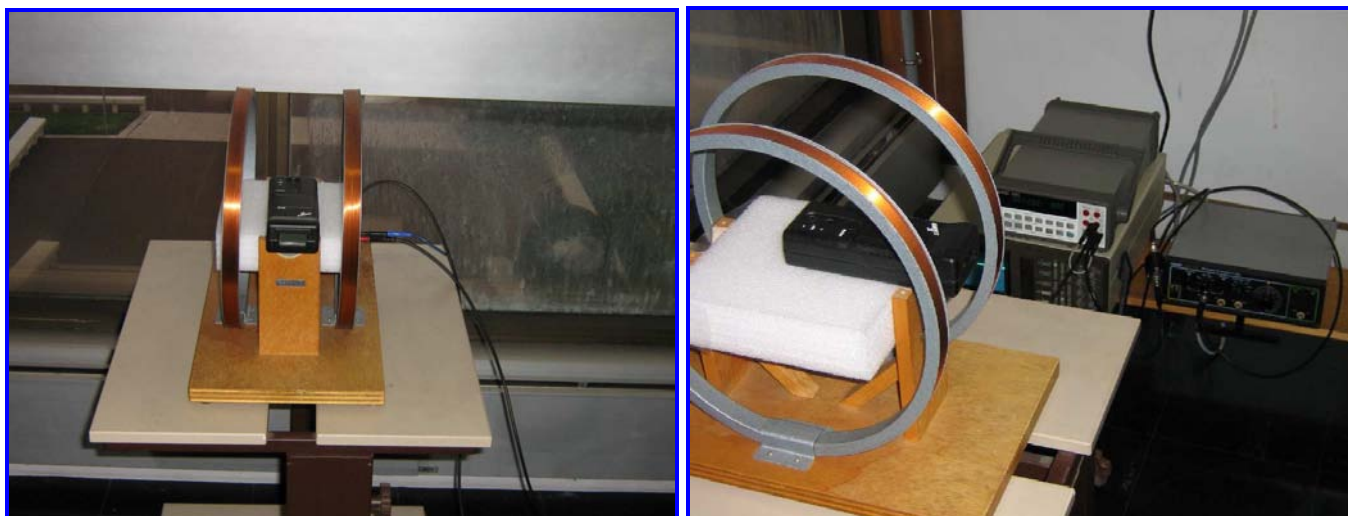


Figure 14 : Photographies du système d'étalonnage

Le générateur (ou l'autotransformateur) permet d'injecter un courant variable de 0 à 100 A à 50 Hz. Ce courant est contrôlé à l'aide du milliampèremètre.

L'étalonnage est effectué à la fréquence de 50 Hz. On injecte un courant connu dans les bobines de Helmholtz et on relève l'indication de l'appareil sous test dans les 3 positions X, Y, Z correspondant à l'axe de chacune des bobines.

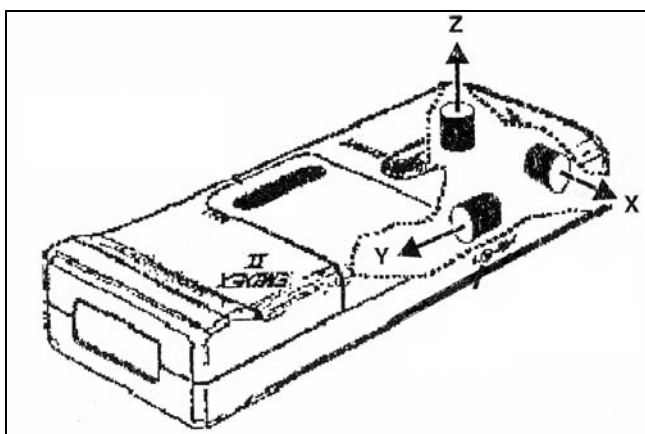


Figure 15 : Position des bobines à l'intérieur de l'Emdex II

Au minimum, les valeurs de courant injecté sont les suivantes. Les valeurs mesurées d'induction magnétique sont comparées aux valeurs théoriques.

Tableau 16 : Tableau d'étalonnage de l'Emdex II

I (mA)	Valeur théorique B (μT)	Valeur mesurée B (μT)		
		en X	en Y	en Z
0,1	0,08			
0,3	0,23			
0,5	0,38			
0,8	0,60			
1	0,75			
3	2,26			
5	3,77			
8	6,0			
10	7,5			
30	22,6			
50	37,7			
80	60,3			
100	75,4			

Pour chaque appareil, on relève le numéro d'identification, la date et le tableau de résultats de mesures. Tous les résultats sont enregistrés dans un fichier Excel.

Annexe 6 : Données de mesure Supélec

FICHE N°1

Type d'appareil :	Radio-réveil
Marque :	M1
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	1,6	0,3	166	5
10	0,8	0,1	72	3
20	0,2	0,02	30	3
30	0,08	0,01	16	2
50	0,04	0,01	8	0,5
80	0,02	0,01	8	0,5
100	0,02	0,01	8	0,5
Ambiance	0,02	0,01	8	0,5

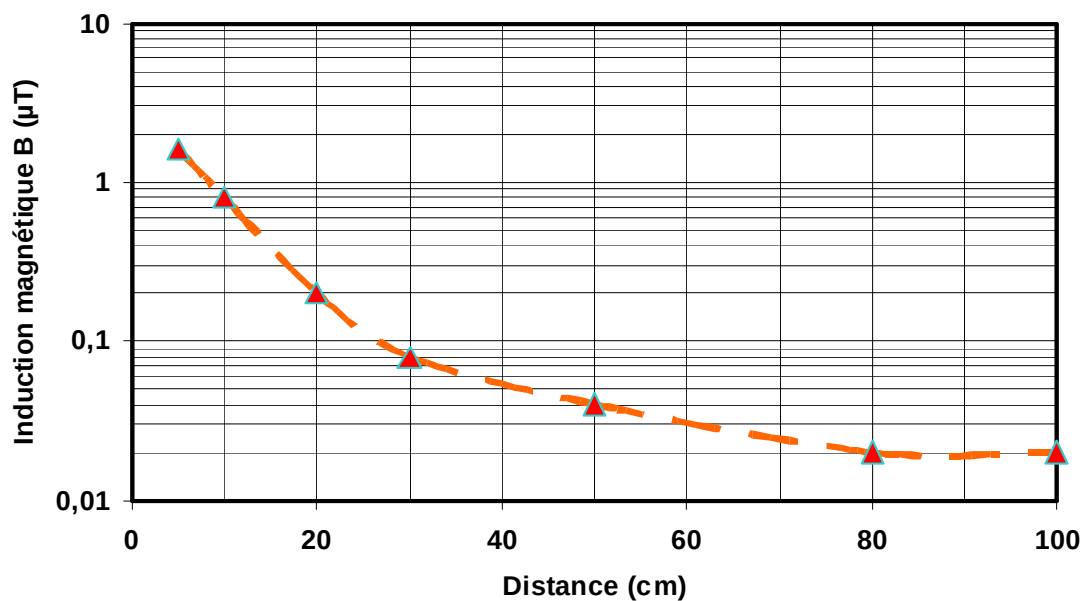


Figure A1 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Radio-réveil M1

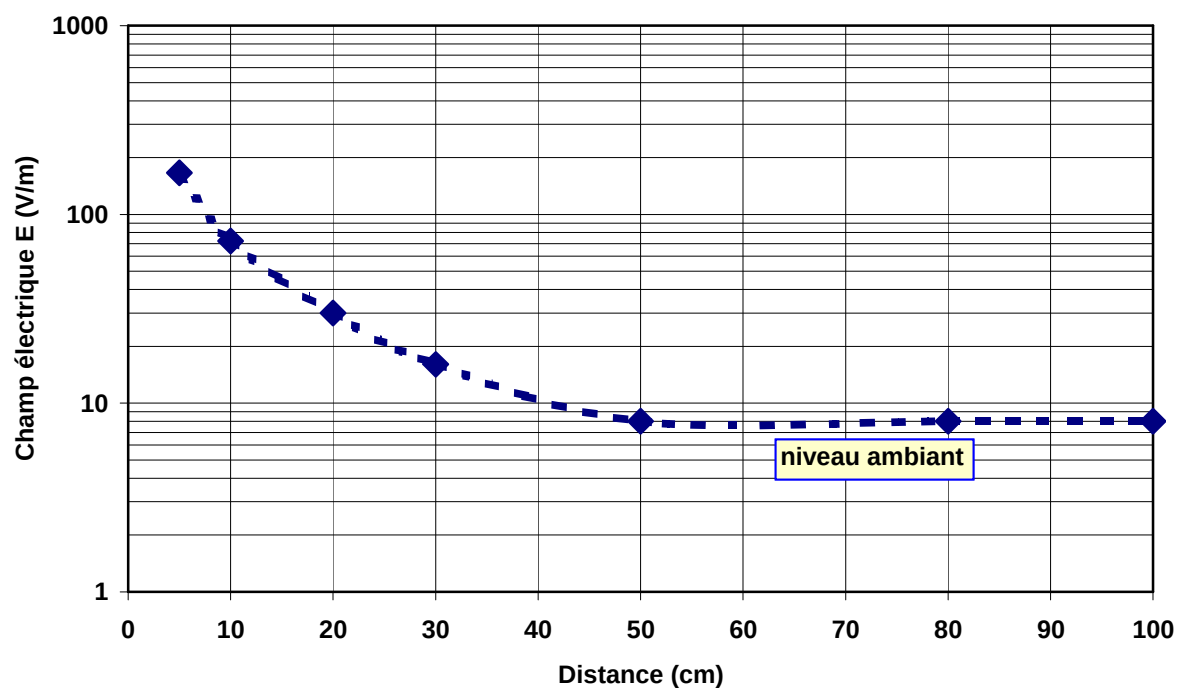


Figure A2 : Variation du champ électrique avec la distance : Radio-réveil M1

FICHE N°2

Type d'appareil :	Bouilloire électrique
Marque :	M2
Référence :	R2
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	1,08	0,08	18	1
10	0,41	0,08	16	1
20	0,13	0,05	14	0,8
30	0,06	0,03	11	0,5
50	0,03	0,02	7	0,3
80	0,02	0,01	6	0,3
100	0,02	0,01	6	0,3
Ambiance	0,02	0,01	6	0,3

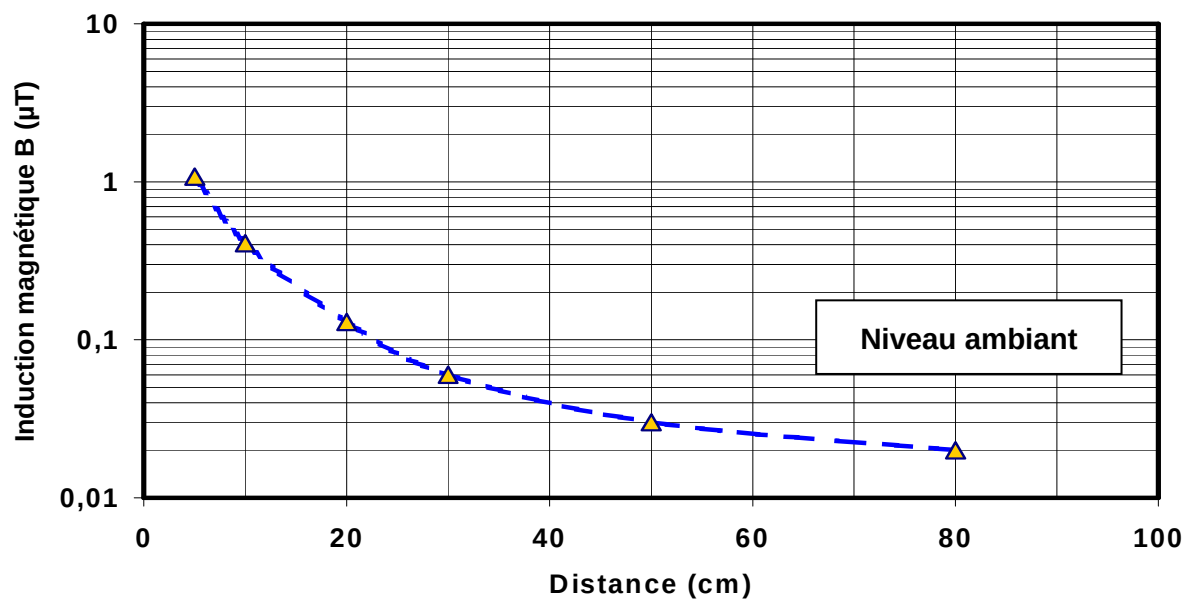


Figure A3 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Bouilloire électrique M2

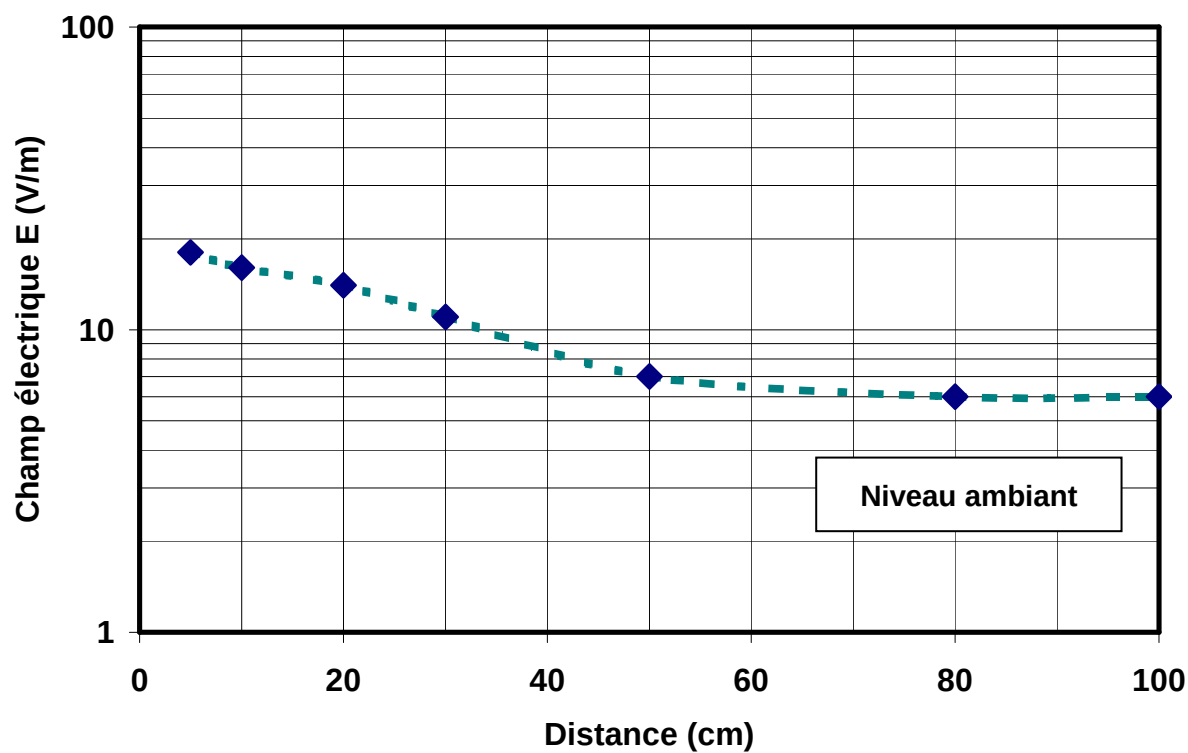


Figure A4 : Variation du champ électrique avec la distance : Bouilloire électrique M2

FICHE N°3

Type d'appareil :	Grille-pain
Marque :	M3
Référence :	R3
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	3,00	0,3	57	2
10	1,30	0,1	20	1
20	0,39	0,05	13	1
30	0,21	0,03	10	0,5
50	0,12	0,02	7,6	0,3
80	0,07	0,02	6	0,3
100	0,06	0,01	6	0,3
Ambiance	0,06	0,01	6	0,3

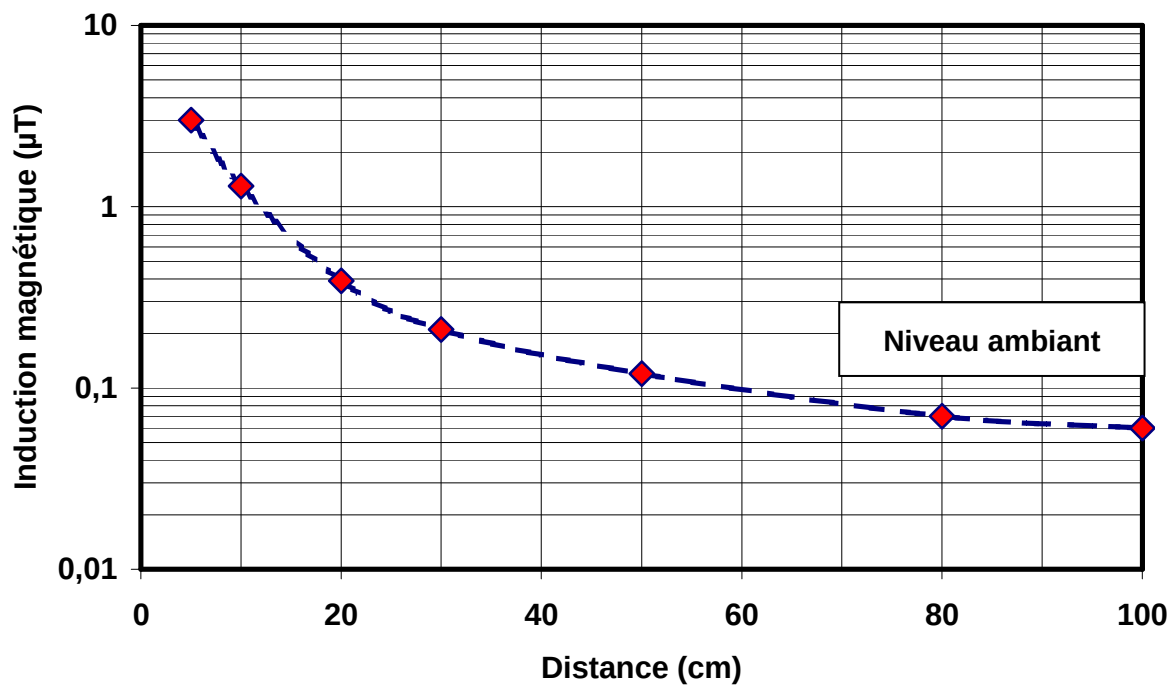


Figure A5 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Grille-pain M3

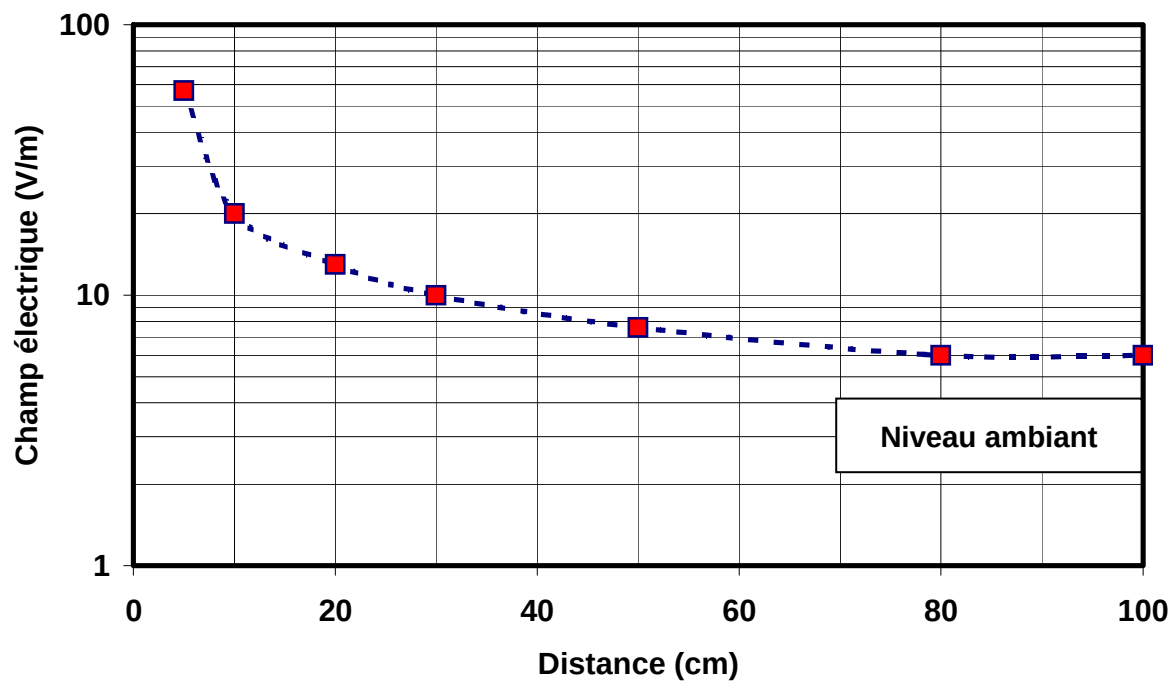


Figure A6 : Variation du champ électrique avec la distance : Grille-pain M3

FICHE N°4

Type d'appareil :	Lave vaisselle
Marque :	M4
Référence :	R4
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	0,5	0,1	25	2
10	0,4	0,1	17	1,5
20	0,27	0,05	12	1
30	0,21	0,05	9	1
50	0,16	0,03	6	0,3
80	0,11	0,03	6	0,3
100	0,08	0,02	6	0,3
Ambiance	0,02	0,01	6	0,3

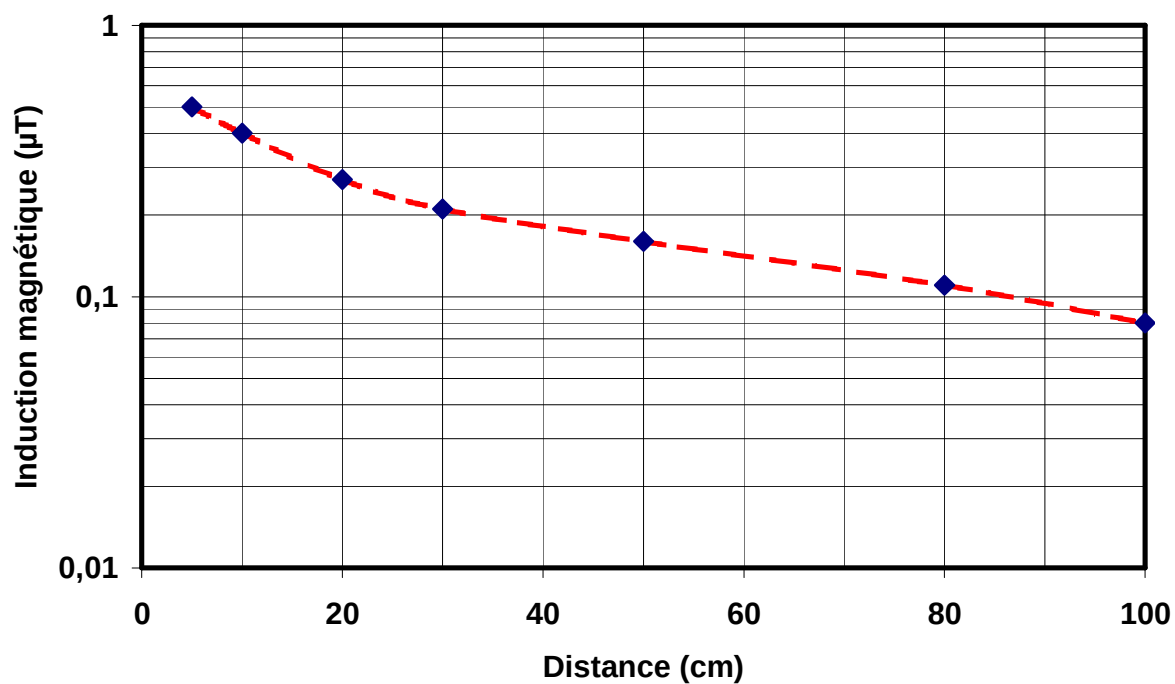


Figure A7 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Lave-vaisselle M4

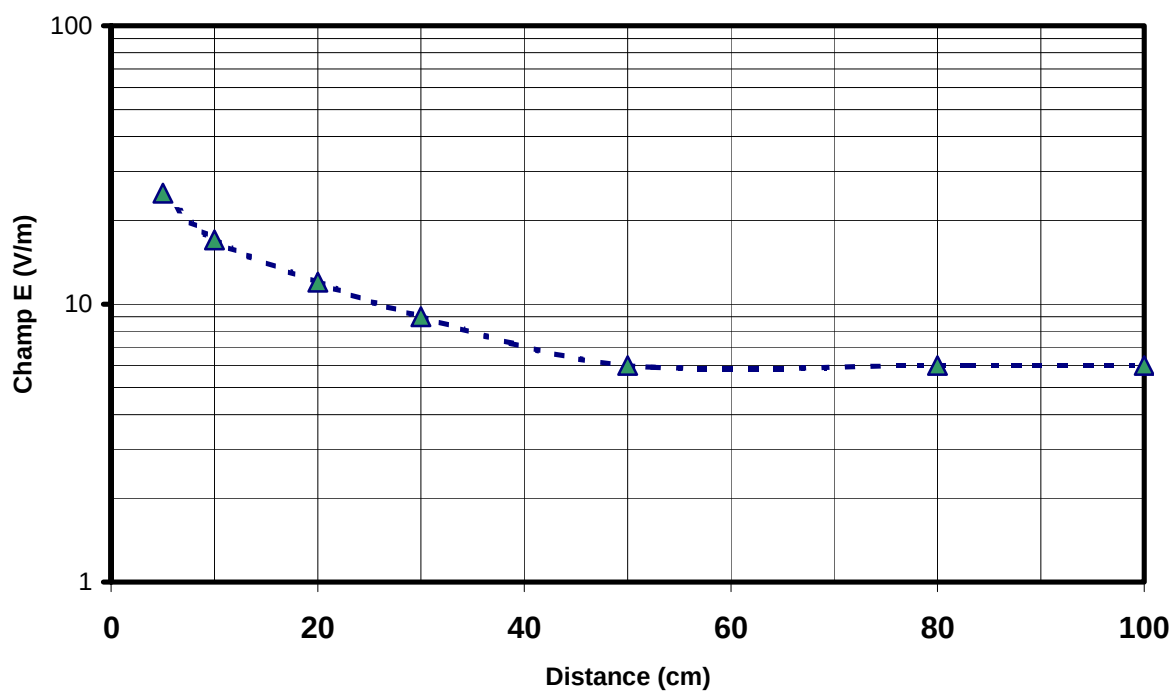


Figure A8 : Variation du champ électrique avec la distance : Lave-vaisselle M4

FICHE N°5

Type d'appareil :	Radio-réveil
Marque :	M5
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	1	0,08	204	3
10	0,65	0,08	130	2
20	0,25	0,05	60	2
30	0,14	0,03	30	1
50	0,05	0,02	21	1
80	0,03	0,01	8	0,8
100	0,03	0,01	6	0,8
Ambiance	0,03	0,01	6	0,8

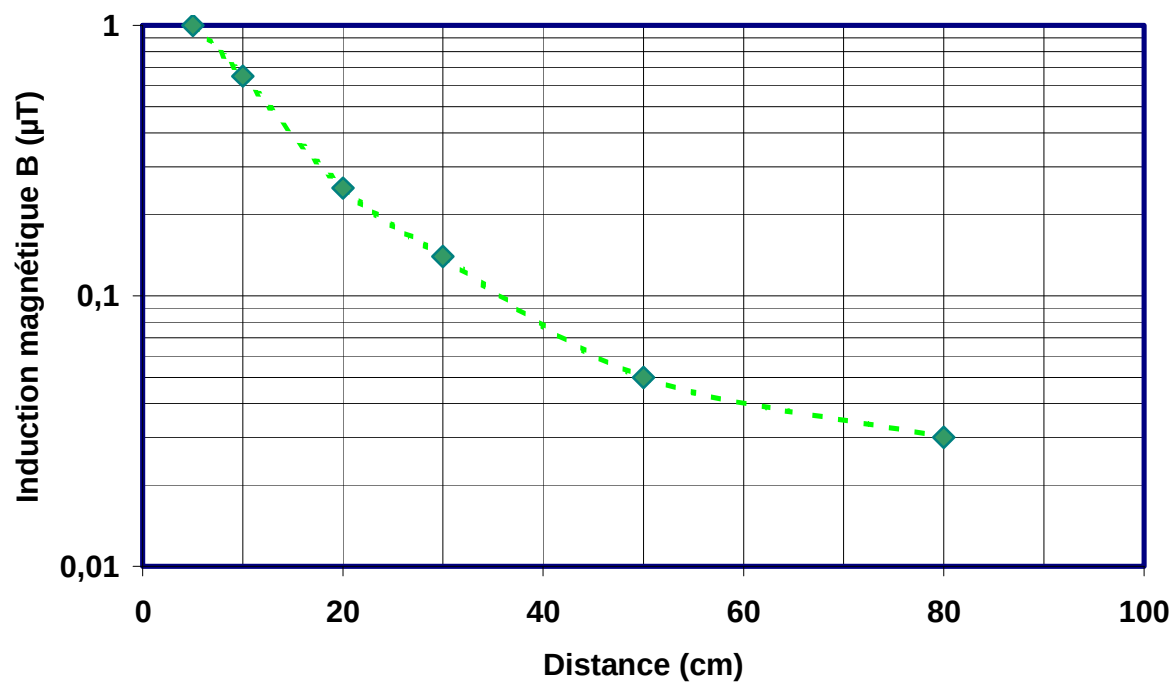


Figure A9 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Radio-réveil M5

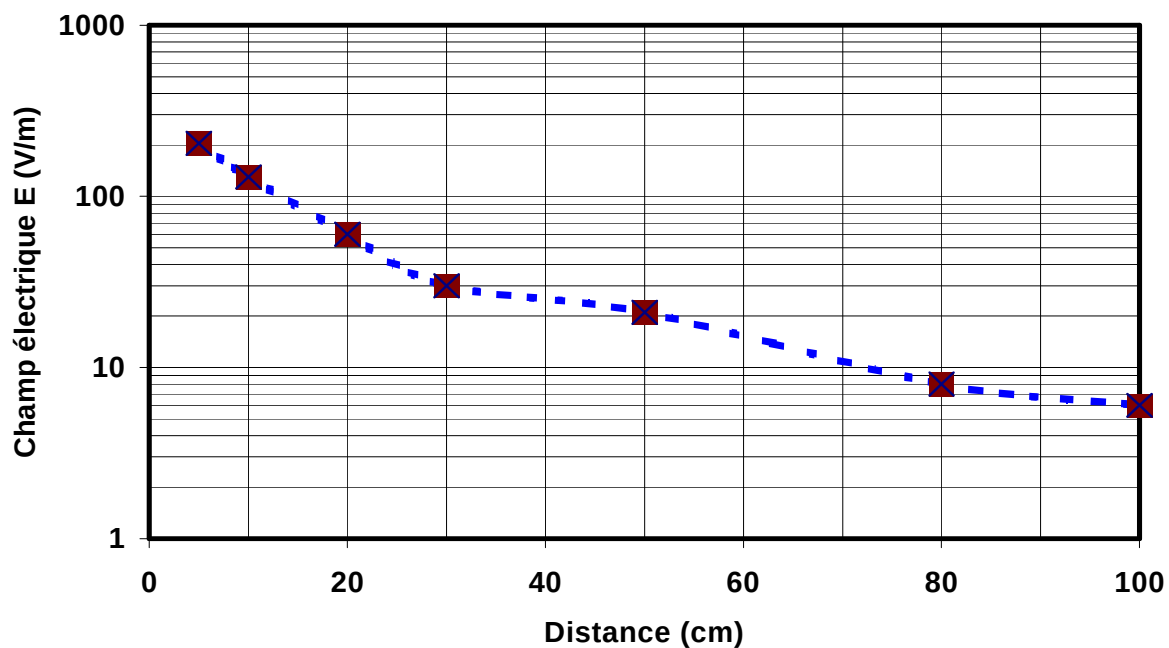


Figure A10 : Variation du champ électrique avec la distance : Radio-réveil M5

FICHE N°6

Type d'appareil :	Machine à café expresso
Marque :	M6
Référence :	R6
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	6,4	0,5	20	2
10	3,5	0,3	10	1
20	1,6	0,2	9	0,5
30	0,7	0,1	8,4	0,5
50	0,3	0,05	6	0,4
80	0,1	0,02	6	0,4
100	0,06	0,01	6	0,4
Ambiance	0,02	0,01	6	0,4

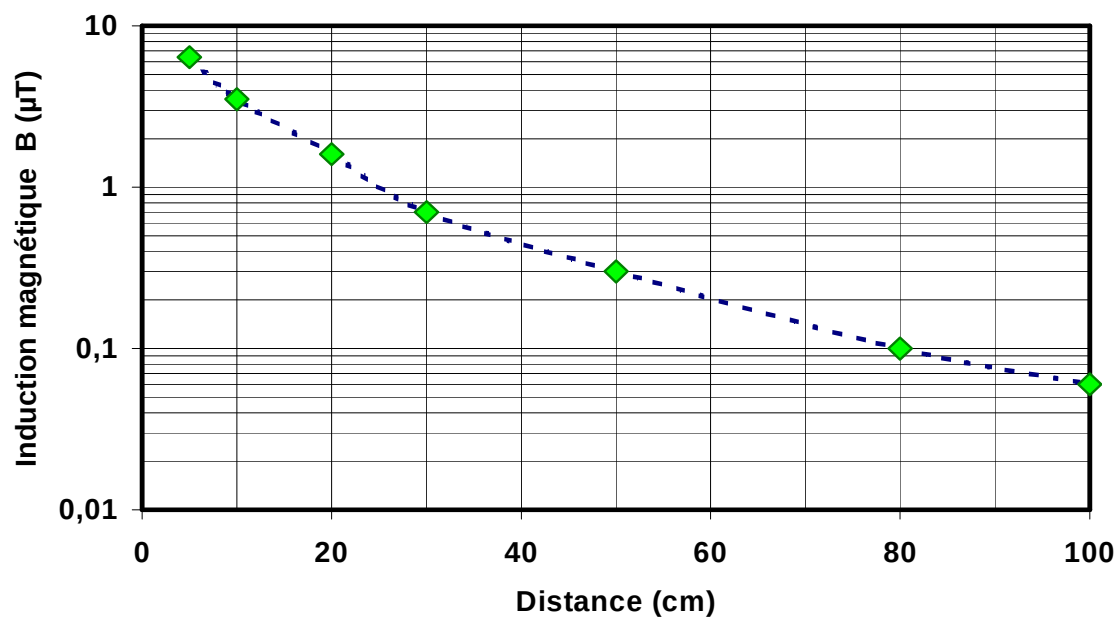


Figure A11 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Cafetière électrique M6

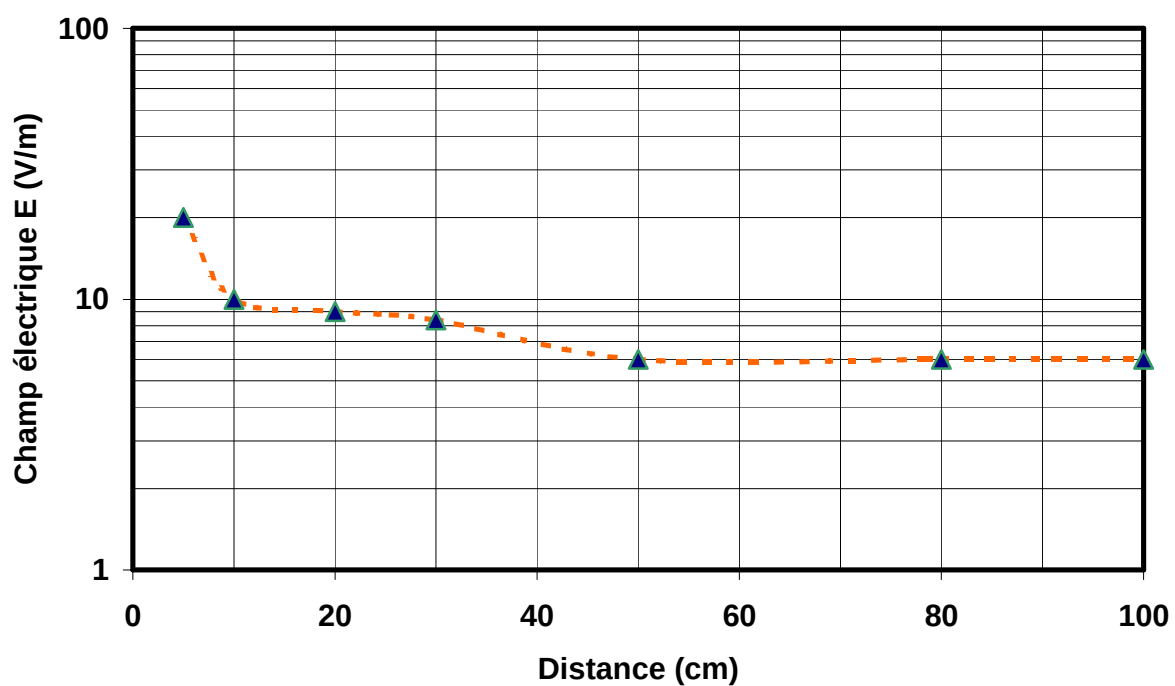


Figure A12 : Variation du champ électrique avec la distance : Cafetière électrique M6

FICHE N°7

Type d'appareil :	Four à micro-ondes
Marque :	M7
Référence :	R7
Photographie de l'appareil	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	22	2	100	5
10	15	2	63	3
20	7	0,5	27	1
30	3,6	0,4	13	0,5
50	1,2	0,2	7	0,3
80	0,45	0,03	6	0,3
100	0,23	0,02	6	0,3
Ambiance	0,02	0,01	6	0,3

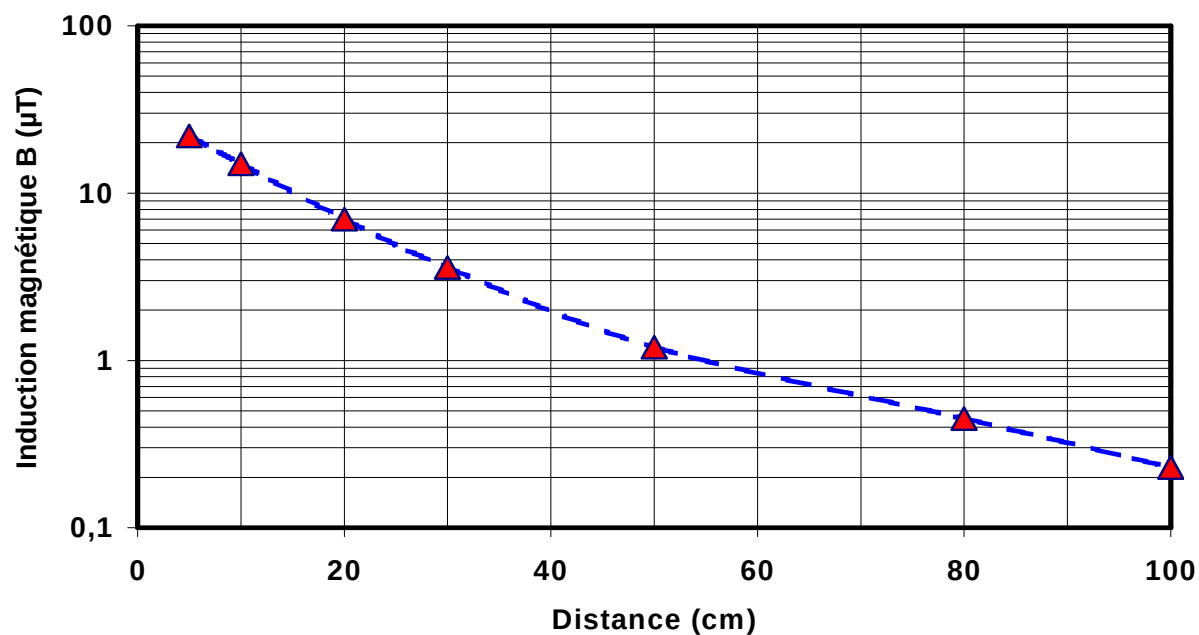


Figure A13 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Four à micro-ondes M7

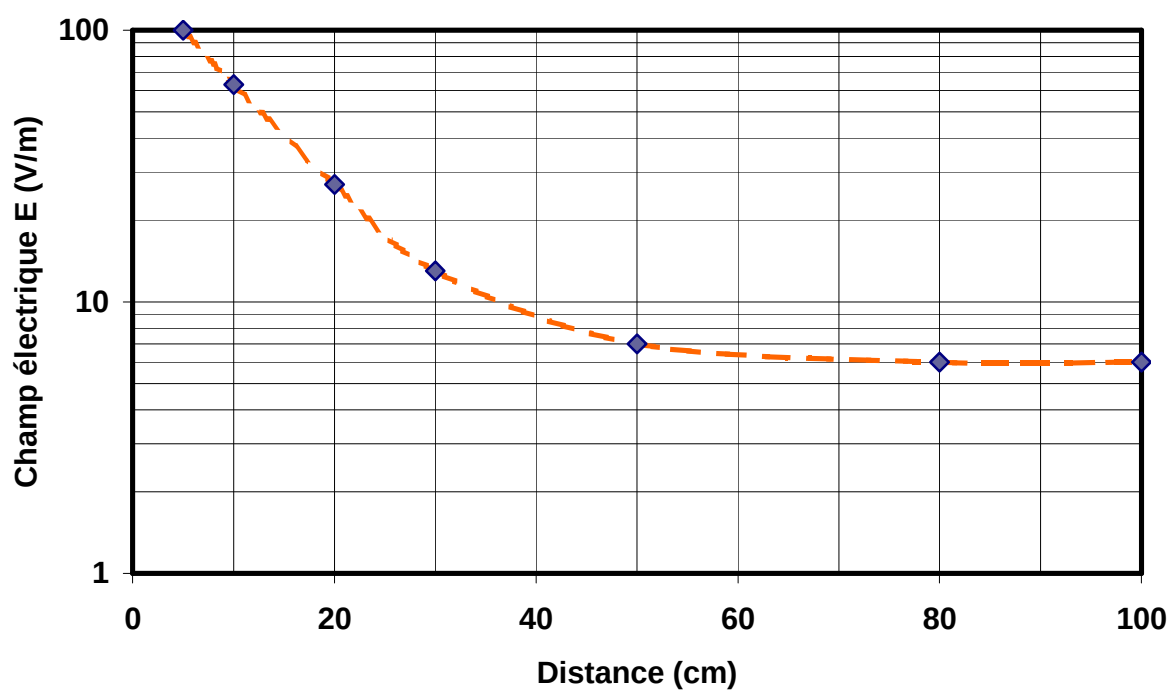


Figure A14 : Variation du champ électrique avec la distance : Four à micro-ondes M7

FICHE N°8

Type d'appareil :	Cuisinière mixte
Marque :	M8
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	1	0,2	12	1
10	0,4	0,1	9	0,5
20	0,3	0,08	7	0,5
30	0,2	0,06	6	0,5
50	0,12	0,04	6	0,5
80	0,05	0,02	6	0,5
100	0,04	0,02	6	0,5
Ambiance	0,02	0,01	6	0,5

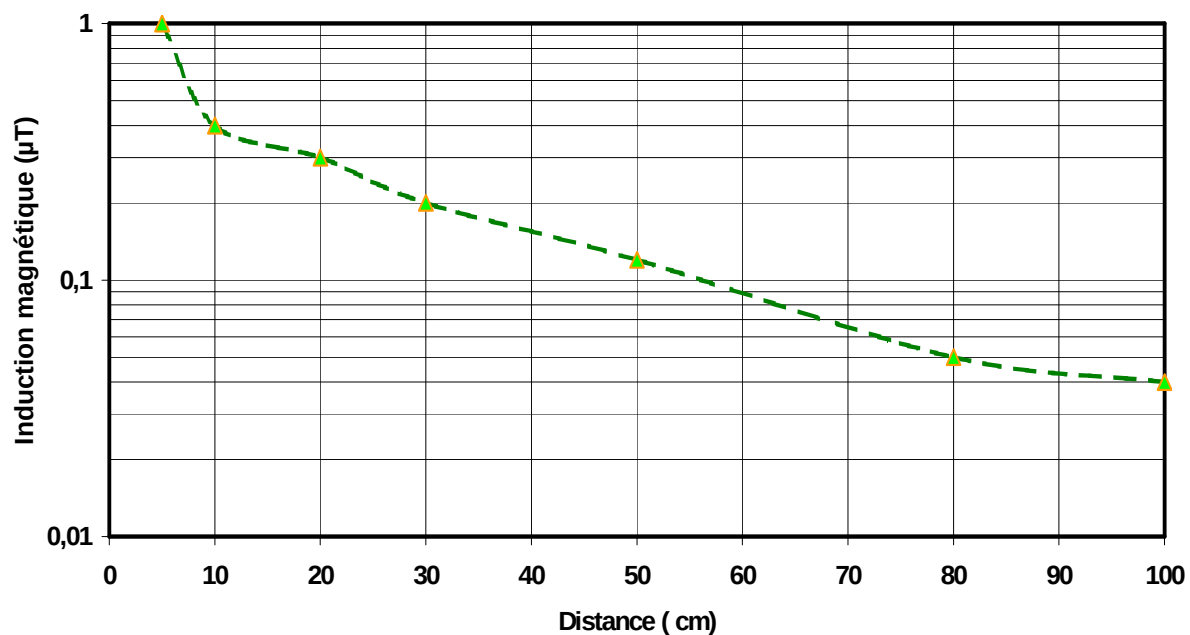


Figure A15 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Cuisinière mixte M8

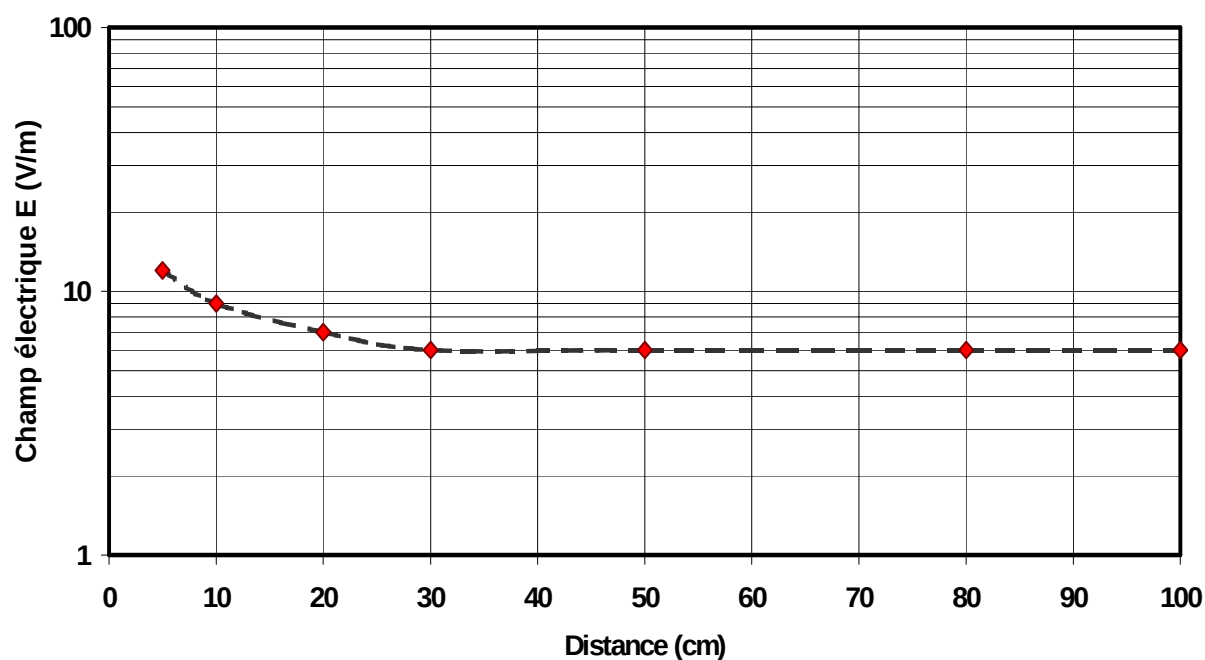


Figure A16 : Variation du champ électrique avec la distance : Cuisinière mixte M8

FICHE N°9

Type d'appareil :	Four à micro-ondes
Marque :	M9
Référence :	R9
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	30	2	10	1
10	23	2	8	1
30	7	1	4	0,5
50	2,7	0,5	4	0,5
100	0,5	0,1	4	0,5
Ambiance	0,13	0,05	4	0,5

Four à micro-ondes : variations de l'induction magnétique B avec la distance

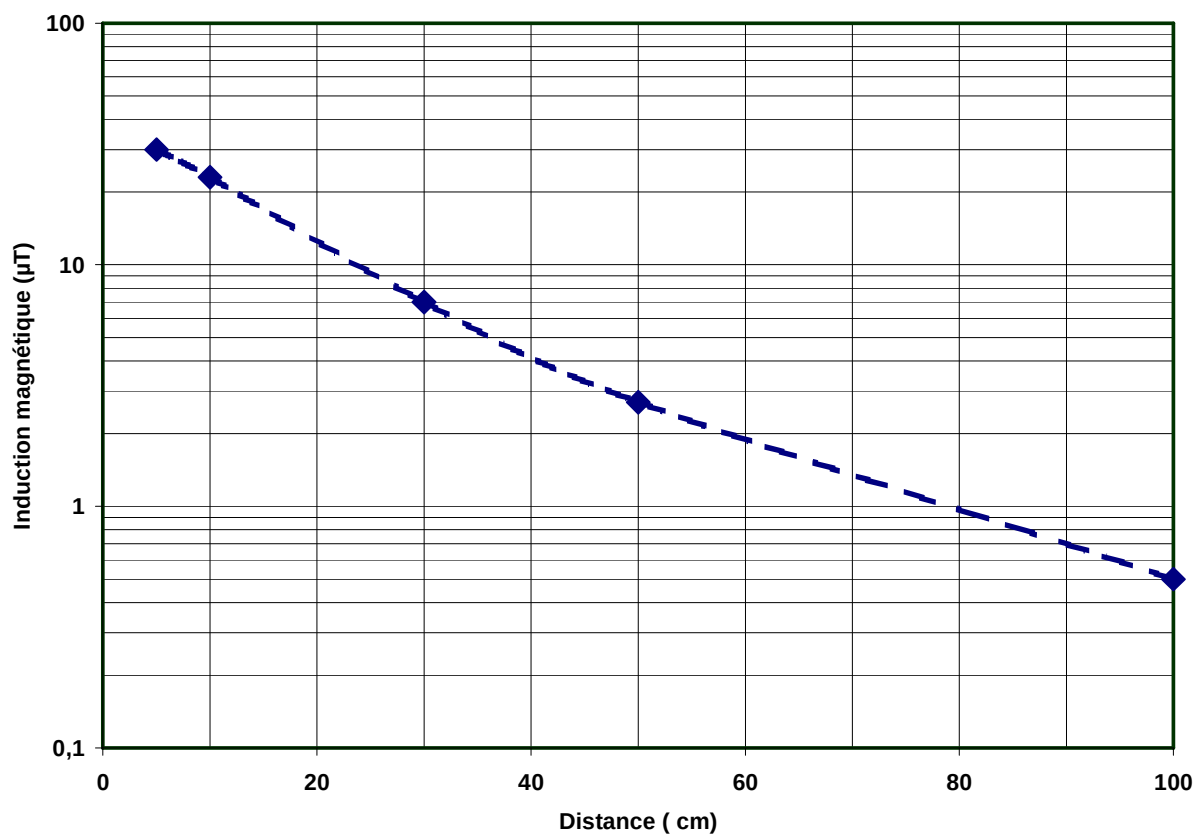


Figure A17 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Four à micro-ondes M9

Le champ électrique produit du côté de la face utilisateur est négligeable.

FICHE N°10

Type d'appareil :	Table à induction
Marque :	M10
Référence :	R10
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	0,57	0,1	94	5
10	0,4	0,08	72	3
20	0,27	0,05	47	3
30	0,2	0,05	32	3
50	0,15	0,05	16	2
80	0,13	0,02	4	0,5
Ambiance	0,13	0,02	4	0,5

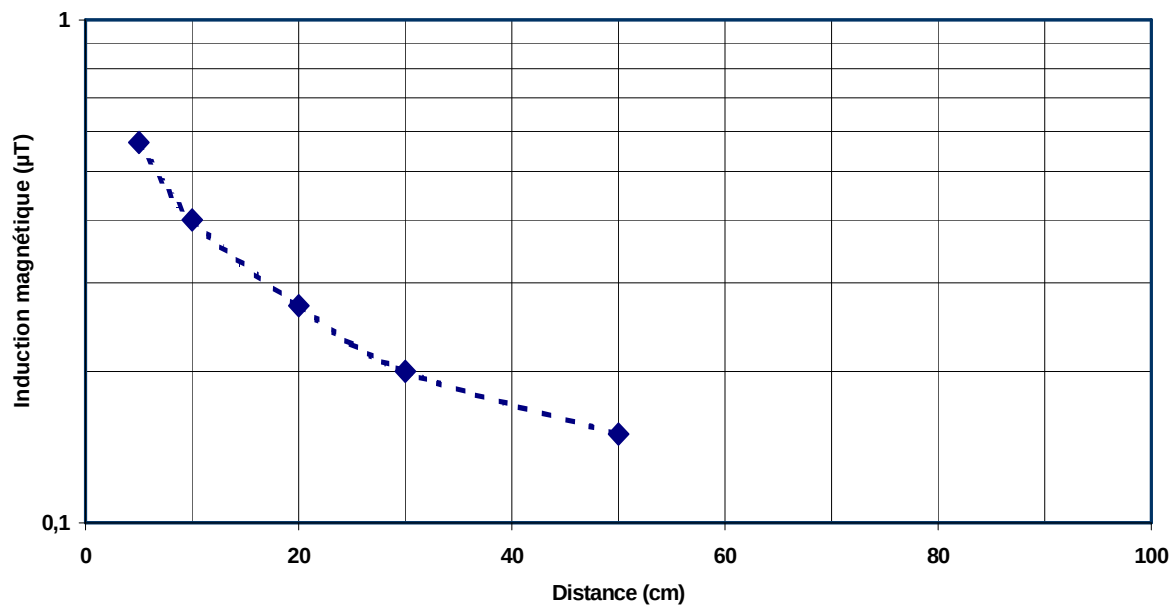


Figure A18 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Table à induction M10

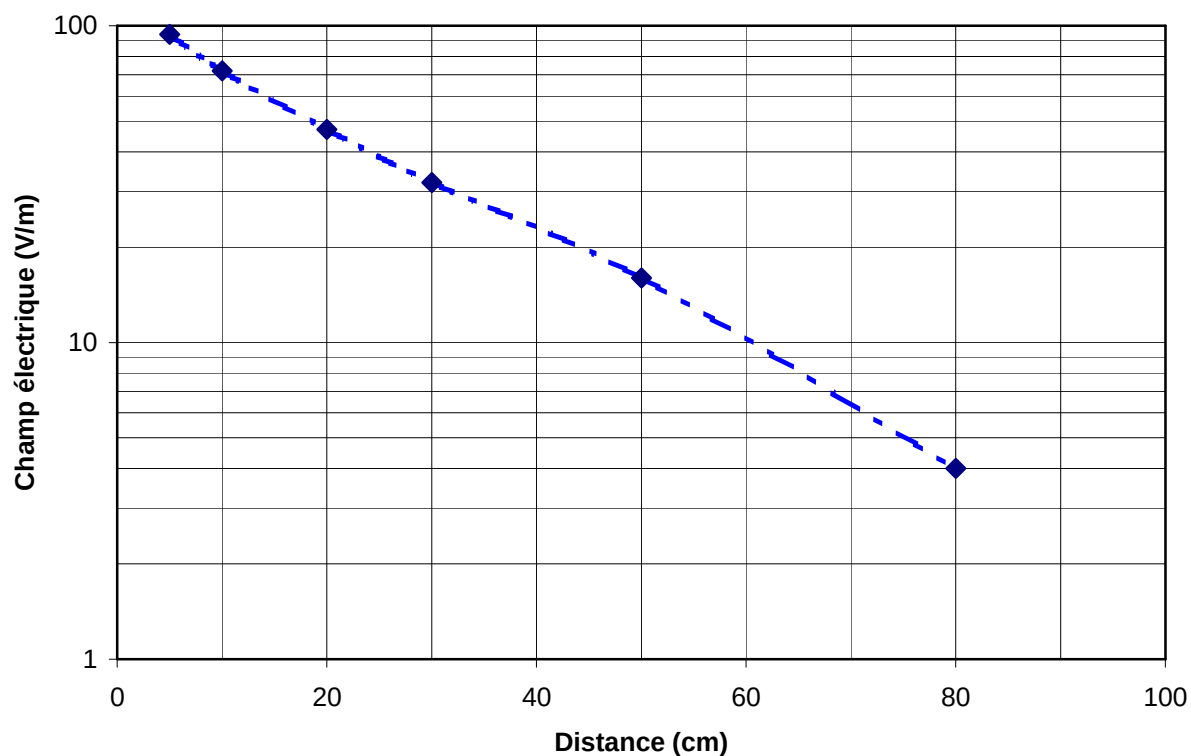


Figure A19 : Variation du champ électrique avec la distance : Table à induction M10

FICHE N°11

Type d'appareil :	Sèche-cheveux
Marque :	M11
Référence :	R11
Appareils de mesure utilisés :	Emdex II USB 03
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m) <i>En fonctionnement</i>	Champ électrique E (V/m) <i>alimenté mais arrêté</i>	Champ électrique E (V/m) <i>alimenté mais arrêté côté tête</i>	Incertitude (V/m)
5	0,72	0,1	187	314	270	5
10	0,43	0,1	109	194	170	4
20	0,15	0,07	53	89	87	2
30	0,05	0,02	28	52	43	2
50	0,04	0,02	14	22	20	1
80	0,04	0,01	7	9	10	1
au niveau de la main, près du moteur	11,0	2,0				
Ambiance	0,04	0,01	4	4	4	0,5

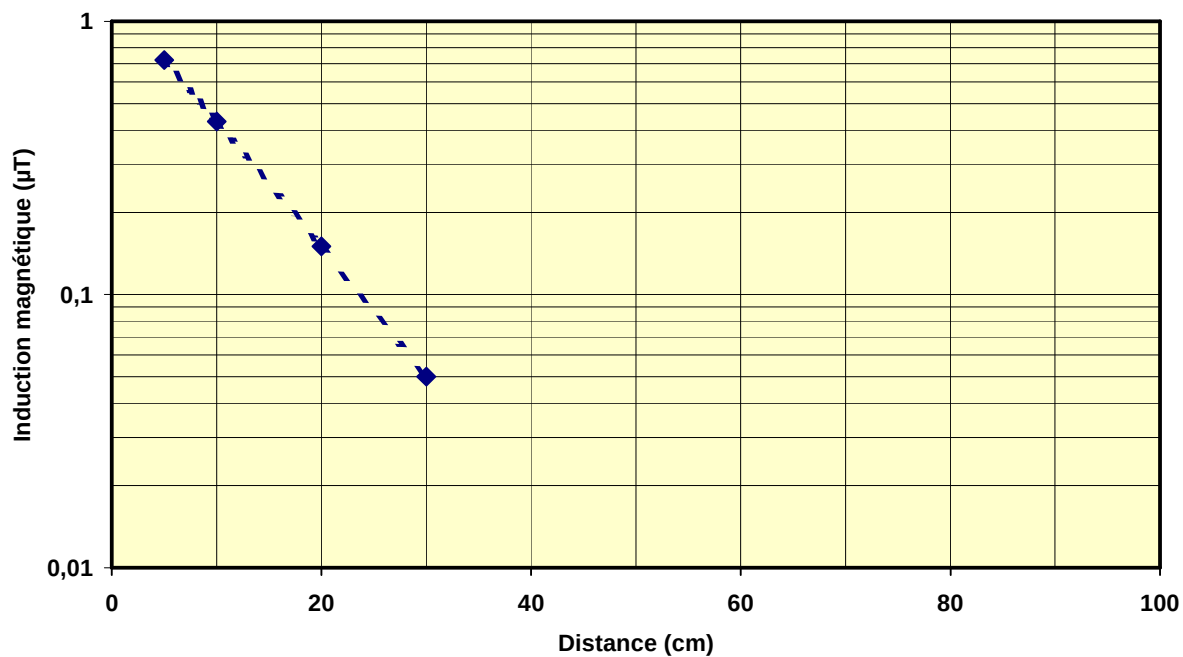


Figure A20 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Sèche-cheveux M11

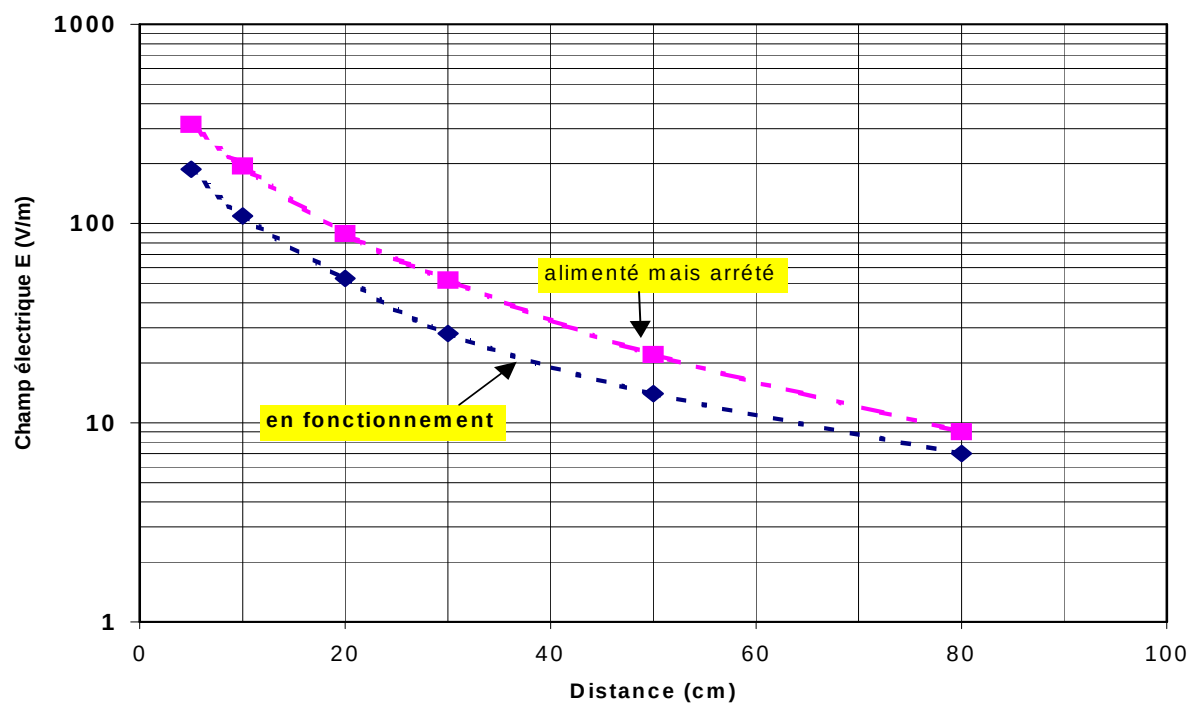


Figure A21 : Variation du champ électrique avec la distance : Sèche-cheveux M11

FICHE N°12

Type d'appareil :	Alimentation de PC
Marque :	M12
Référence :	R12
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μT)	Incertitude (μT)	Champ électrique E (V/m)	Incertitude (V/m)
5	0,55	0,1	178	5
10	0,17	0,04	96	3
20	0,04	0,01	42	2
30	0,02	0,01	25	2
50	0,01	0,01	11	1
80	0,01	0,01	7	1
100	0,01	0,01	4	0,3
Ambiance	0,01	0,01	4	0,3

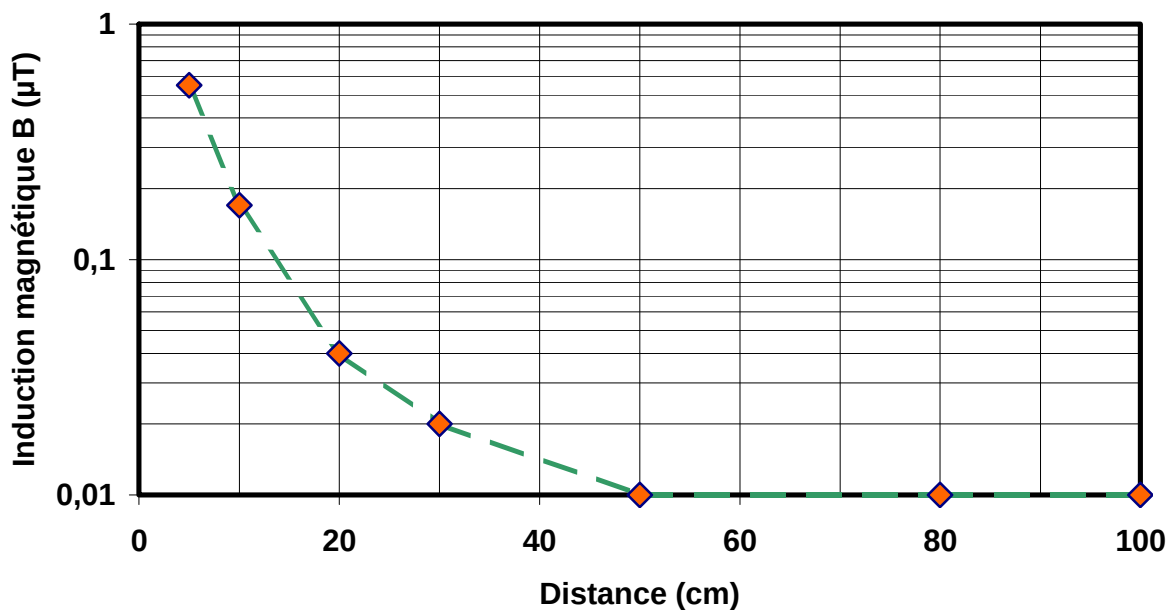


Figure A22 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Bloc alimentation de PC M12

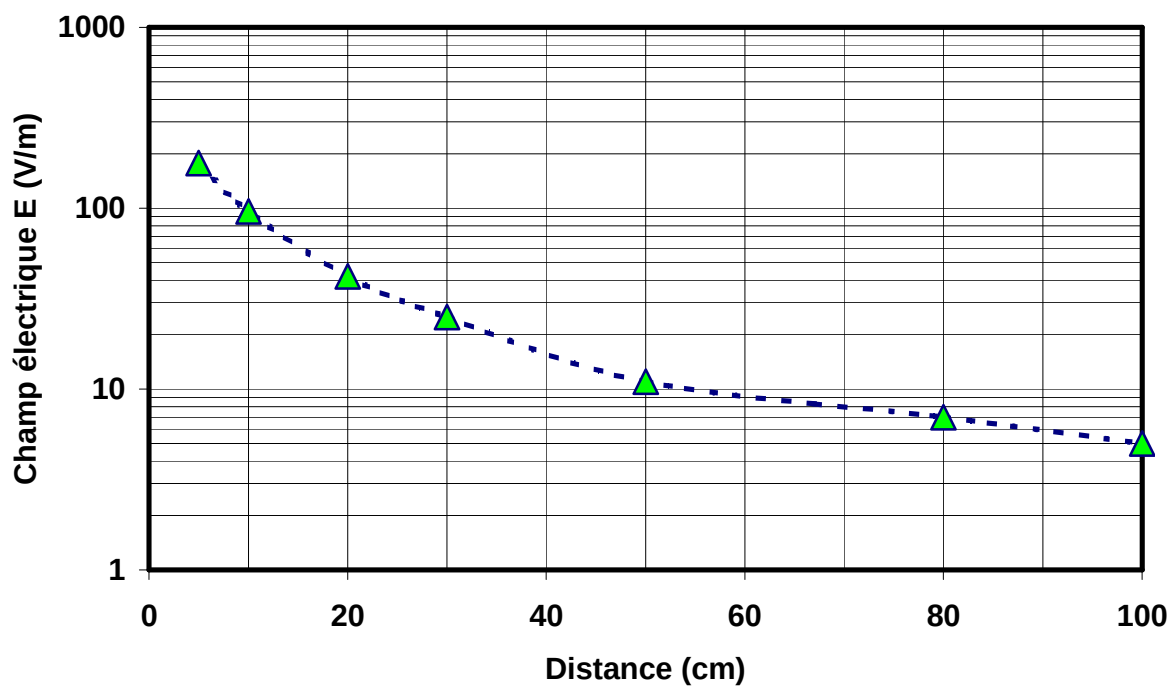


Figure A23 : Variation du champ électrique avec la distance : Bloc alimentation de PC M12

FICHE N°13

Type d'appareil :	Bouilloire
Marque :	M13
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μ T)	Incertitude (μ T)	Champ électrique E (V/m) <i>Bouilloire en fonctionnement</i>	Champ électrique E (V/m) <i>Bouilloire alimentée mais à l'arrêt</i>	Incertitude (V/m)
5	0,5	0,1	95	104	5
10	0,3	0,08	55	66	4
20	0,11	0,05	32	39	4
30	0,05	0,02	18	22	2
50	0,04	0,01	8,5	10	1
60	0,04	0,01	7	8	0,5
80	0,04	0,01	4	4	0,3
Ambiance	0,04	0,01	4	4	0,3

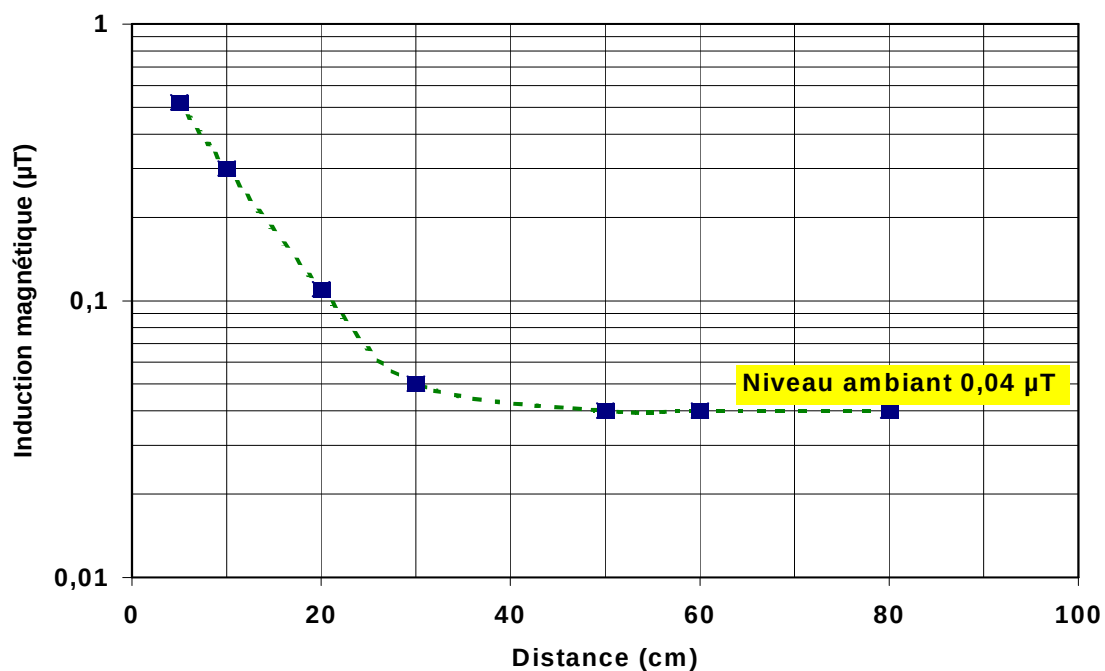


Figure A24 : Variation de l'induction (champ) magnétique avec la distance : Bouilloire électrique M13

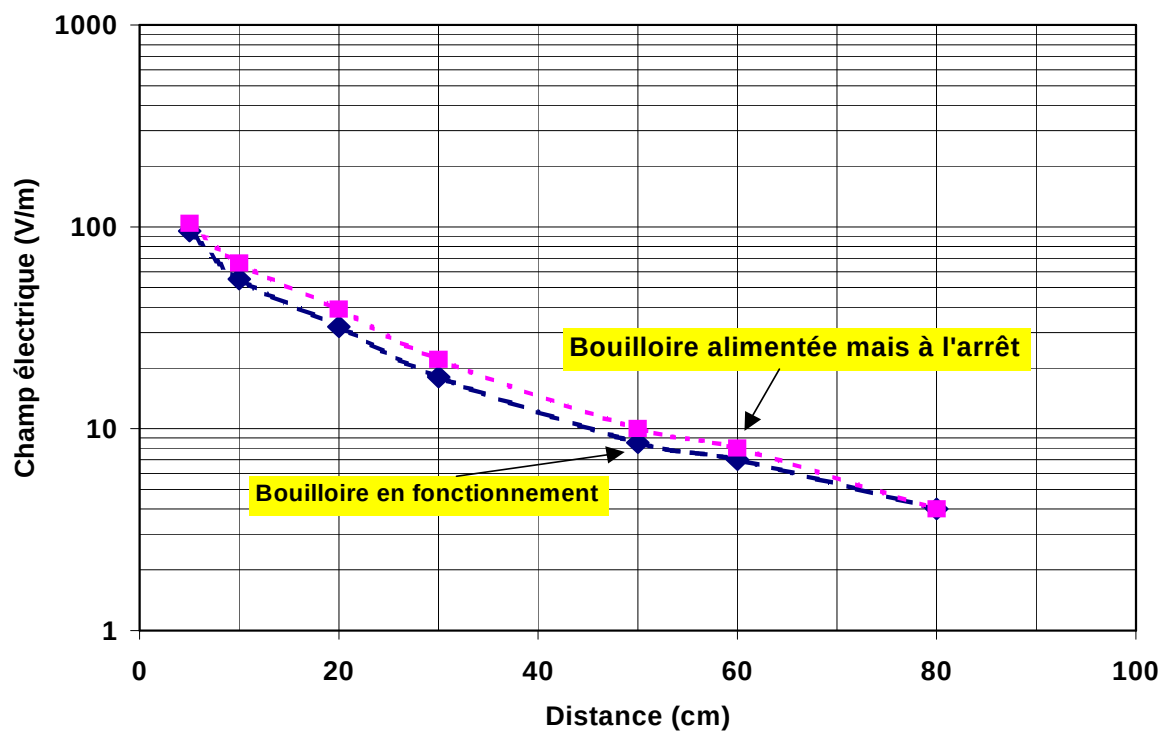


Figure A25 : Variation du champ électrique avec la distance : Bouilloire électrique M13

FICHE N°14

Type d'appareil :	Téléviseur LCD 15 pouces, mesures face au téléviseur (alimentation secteur déportée à la prise)
Marque :	M15
Référence :	R15
Numéro de série (éventuellement)	
Appareil de mesure utilisé :	Emdex II USB 03
	Narda EFA 300
Photo de l'appareil :	

Distance (cm)	Induction magnétique B (μ T)	Incertitude (μ T)	Champ électrique E (V/m) Allumé ou éteint (mais alimenté)	Incertitude (V/m)
5	0,01		364	20
10	0,01		253	15
20	0,01		132	10
30	0,01		75	5
50	0,01		35	4
80	0,01		16	2
100	0,01		10	2
Ambiance	0,01		10	2

Ce téléviseur est alimenté en basse tension à partir d'un bloc secteur mural. Devant l'écran, nous n'avons pas noté de valeur d'induction magnétique particulière, par contre, le champ électrique est parfaitement mesurable.

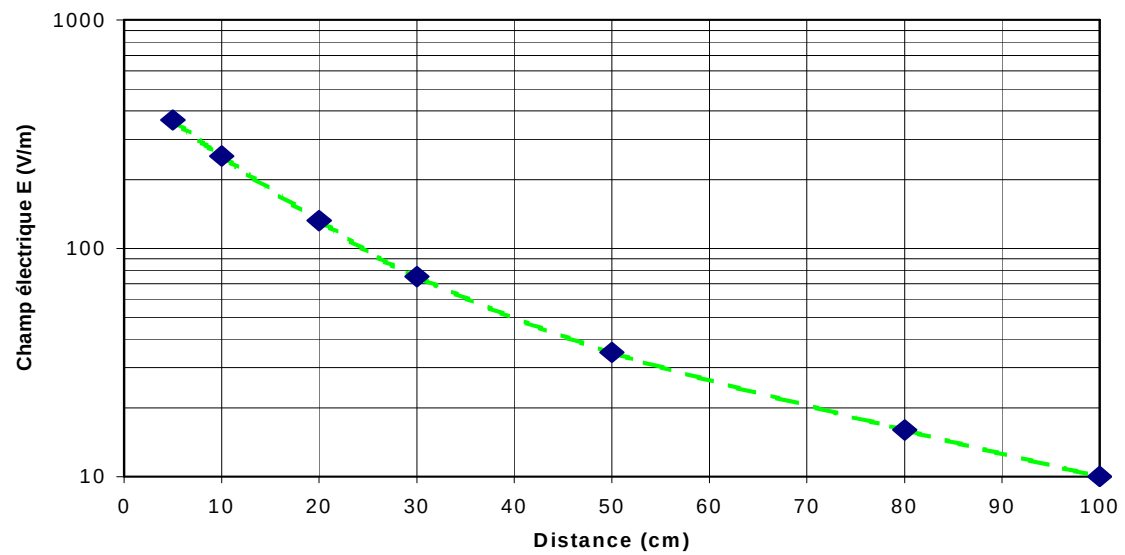


Figure A26 : Variation du champ électrique E avec la distance : Téléviseur M15

Annexe 7 : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
LD	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière ...)
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
SR-A	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU CES PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :	Rubrique de la DPI Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	
ANFOSSO-LÉDÉE	Fabienne	13 mai 2008 23 juin 2008 09 décembre 2009
Analyse Afsset :	Aucun lien déclaré /	
BÉRENGIER	Michel	29 avril 2008 07 mai 2008 23 octobre 2009
Analyse Afsset :	Aucun lien déclaré /	

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :	Rubrique de la DPI Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	
CÉSARINI	Jean-Pierre	29 avril 2008 15 mai 2008 09 mars 2009 02 novembre 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
COHEN	Jean-Claude	06 mai 2008 23 juin 2008 26 octobre 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
COURANT	Daniel	28 avril 2008 23 juin 2008 03 novembre 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
COUTURIER	Frédéric	29 avril 2008 15 mai 2008 07 décembre 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
DEBOUZY	Jean-Claude	29 avril 2008 06 mai 2008 24 octobre 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	
DORÉ	Jean-François	29 avril 2008 11 mai 2009
	Aucun lien déclaré	
Analyse Afsset :	/	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :		
EL KHATIB	Aïcha Aucun lien déclaré	30 avril 2008 23 juin 2008 23 janvier 2010
Analyse Afsset :	/	
FLAHAUT	Emmanuel Aucun lien déclaré	29 avril 2008 17 juillet 2008 23 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
GAFFET	Éric Aucun lien déclaré	29 avril 2008 09 juin 2008 23 juin 2008 11 août 2008 06 novembre 2008 24 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
HOURS	Martine Aucun lien déclaré	29 avril 2008 30 avril 2008 26 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
JOB	Agnès Aucun lien déclaré	29 avril 2008 23 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	
LABEYRIE	Antoine Aucun lien déclaré	25 avril 2008 28 avril 2008 20 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :		
LAMBERT	Jacques Aucun lien déclaré	06 mai 2008
Analyse Afsset :	/	
LAURIER	Dominique Aucun lien déclaré	13 mai 2008
Analyse Afsset :	/	
LE BIHAN	Olivier Aucun lien déclaré	22 avril 2008 23 juin 2008 08 décembre 2008 15 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
LEPOUTRE	Philippe Aucun lien déclaré	25 avril 2008 23 juin 2008 27 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
MARCHAL	Didier Aucun lien déclaré	29 avril 2008 07 janvier 2009 24 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
MOCH	Annie Aucun lien déclaré	29 avril 2008 24 janvier 2009
Analyse Afsset :	/	
PIRARD	Philippe Aucun lien déclaré	15 mai 2008 24 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :		
PLANTON	Serge Aucun lien déclaré	23 juin 2008 10 juillet 2008 27 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	
RUMEAU	Michel Aucun lien déclaré	02 mai 2008 23 juin 2008 20 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	
De SÈZE	René Aucun lien déclaré	12 juin 2008 23 juin 2008 20 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	
TARDIF	François Aucun lien déclaré	15 avril 2008 26 novembre 2008 20 novembre 2009
Analyse Afsset :	/	
VALLET	Michel Aucun lien déclaré	24 avril 2008 09 décembre 2009
Analyse Afsset :	/	
VECCHIA	Paolo Aucun lien déclaré	29 avril 2008 06 mai 2009 26 octobre 2009
Analyse Afsset :	/	

SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES EXPERTS RAPPORTEURS PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Afsset :		

BOUNOUH	Alexandre Aucun lien déclaré	30 mai 2009
Analyse Afsset :	/	
BRUGERE	Henri Aucun lien déclaré	18 mai 2009
Analyse Afsset :	/	
CLAVEL	Jacqueline Aucun lien déclaré	29 mai 2009
Analyse Afsset :	/	
FEBVRE	Pascal Aucun lien déclaré	19 mai 2009
Analyse Afsset :	/	
LAGROYE	Isabelle Etude d'effets des champs EBF (contrat EDF avec financement du laboratoire IMS à hauteur de 0,7 % annuel (travaux de post-doc 2007-2009), géré par l'université Bordeaux 1	28 mai 2009
Analyse Afsset :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine.	
VECCHIA	Paolo (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ») Aucun lien déclaré	29 avril 2008 06 mai 2009
Analyse Afsset :	/	



agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

253, avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél. +33 1 56 29 19 30
www.afsset.fr

ISBN 978-2-11-098864-5

