

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

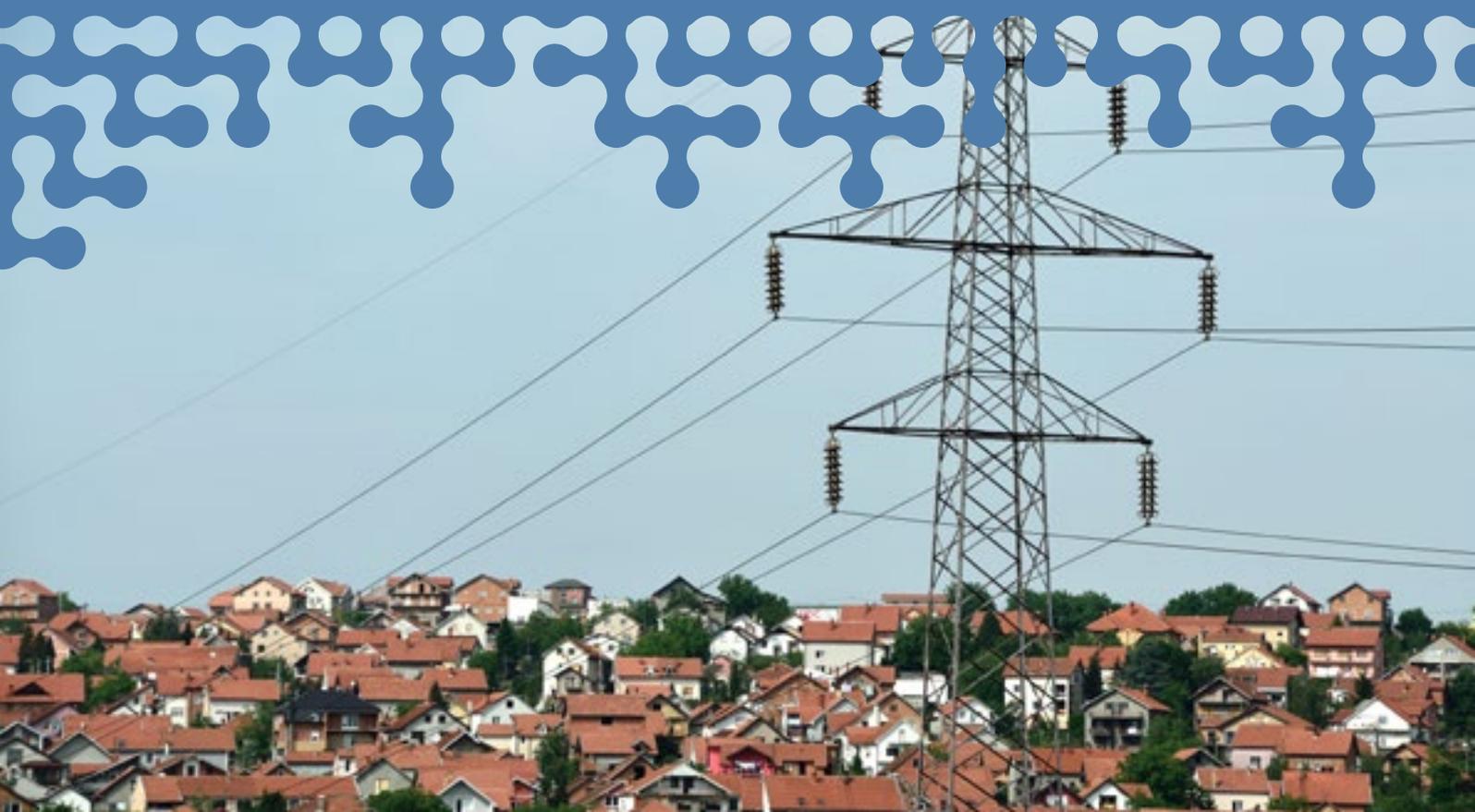


Connaître, évaluer, protéger

Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

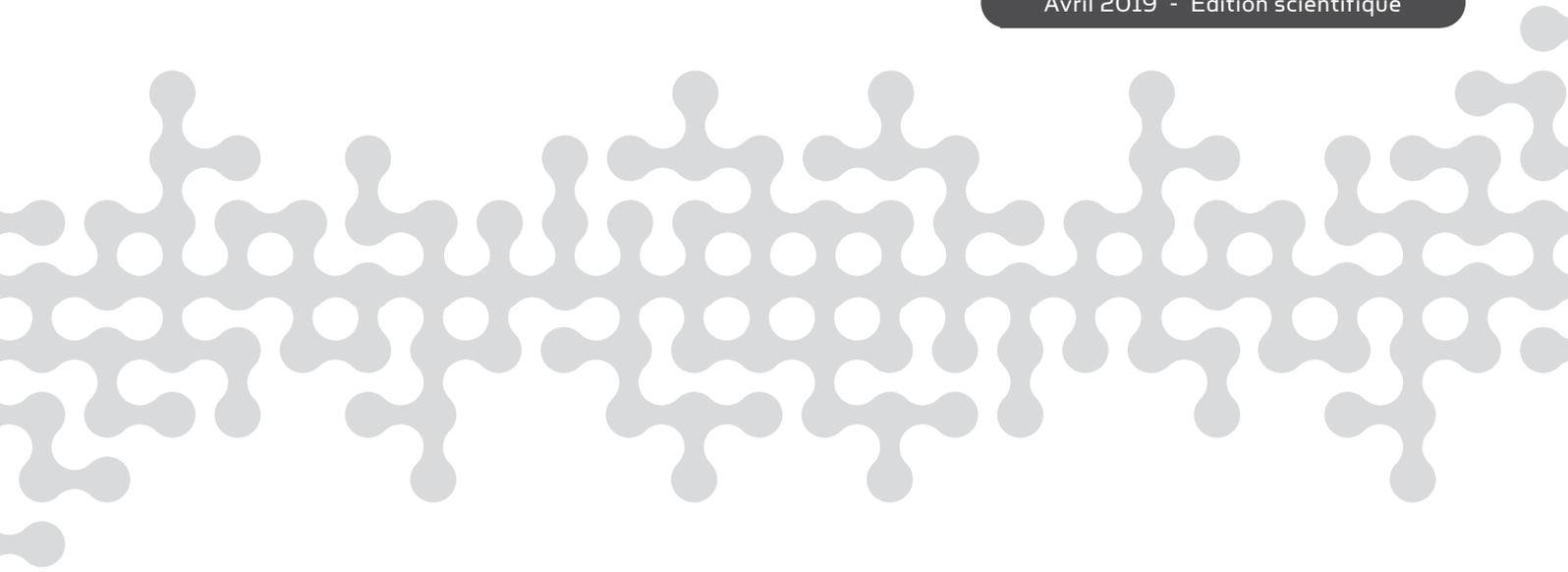
Avril 2019 - Édition scientifique



Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Avril 2019 - Édition scientifique



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 5 avril 2019

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif aux « Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 27 février 2013 par les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture pour la réalisation de l'expertise suivante : « mise à jour de l'expertise relative aux champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences ».

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

En 2010, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) a publié un avis, assorti d'un rapport d'expertise, intitulé « synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ». Cette expertise concluait à une forte convergence entre les différentes évaluations des expertises internationales sur de possibles effets sanitaires à long terme, notamment concernant l'association entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et la leucémie infantile.

Plus récemment, l'étude Géocap, dont l'objectif était d'étudier l'influence de différentes expositions environnementales en France sur le risque de cancer de l'enfant, a mis en évidence, chez les enfants âgés de moins de 5 ans, une association statistiquement significative entre le fait d'habiter

à moins de 50 m de l'aplomb d'une ligne de transport d'électricité à très haute tension (supérieure à 225 kV) et le risque de développer une leucémie infantile (Sermage-Faure *et al.* 2013).

Dans ce contexte, les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture ont sollicité l'Anses afin de mettre à jour l'expertise sur les effets sanitaires, pour l'Homme et l'animal, liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

En réponse à la demande portant sur la santé animale, l'Anses a publié, en août 2015, un avis et un rapport d'expertise sur les « conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques ». Le présent avis concerne les effets sanitaires chez l'Homme de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Dans le cadre de cette expertise, les champs électromagnétiques « basses fréquences » sont définis par le domaine fréquentiel suivant : $0 \text{ Hz} < f \leq \text{quelques kHz}$.

À noter que les termes « extrêmement basses fréquences » sont utilisés dans la littérature soit comme synonyme de « basses fréquences » soit pour désigner une bande de fréquences plus limitée, comprise entre 0 Hz et quelques Hz.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

■ Expertise collective

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté le groupe de travail « Champs électromagnétiques basses fréquences » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 26 février 2015. Les experts de ce groupe ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de la métrologie et de l'exposimétrie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la physiologie et de la réglementation dans le domaine des champs électromagnétiques.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec 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 ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques via le site internet : <https://www.anses.fr>.

■ Contributions extérieures

Afin de combler un manque de données dans le domaine de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences de la population française, et des enfants en particulier, une « convention de recherche et développement » (CRD) a été établie avec le laboratoire U1086 ANTICIPE de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) le 29 avril 2016. L'objectif de cette étude était d'une part, d'estimer le nombre de personnes

habitant à proximité d'une ligne à haute ou très haute tension¹ en France (≥ 63 kV), et, d'autre part, de dénombrer les établissements d'accueil de jeunes enfants et les écoles du premier degré situés à proximité de ces lignes, et d'en déduire le nombre d'enfants les fréquentant.

■ Méthode d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires

Pour évaluer le niveau de preuve associé à chaque effet sanitaire, le groupe de travail s'est appuyé sur l'ensemble des données disponibles :

- les résultats et conclusions des expertises antérieures à 2010 réalisées par l'Anses et par des organismes nationaux étrangers et internationaux ;
- l'analyse systématique des études scientifiques publiées depuis 2010.

Revue et analyse bibliographique des articles publiés depuis 2010

Cette expertise, conformément aux principes méthodologiques en vigueur à l'Anses, est principalement fondée sur l'analyse de la littérature scientifique disponible. La période de référence pour la veille bibliographique s'étend de janvier 2010 à décembre 2015. À noter que certaines publications parues avant 2010 et après 2015 ont été prises en compte, notamment pour compléter l'état de l'art des connaissances relatives aux différents effets sanitaires étudiés.

Compte tenu du nombre très important de publications identifiées par la recherche bibliographique, le groupe de travail a priorisé les travaux à effectuer dans le cadre de cette expertise. Ainsi, après avoir listé de manière exhaustive l'ensemble des effets sanitaires explorés par la littérature scientifique, le groupe de travail a considéré comme prioritaire l'expertise des effets sanitaires suivants : la leucémie de l'enfant, les autres cancers et les maladies neurodégénératives. Par ailleurs, considérant la valeur limite d'exposition réglementaire pour les travailleurs exposés à des champs magnétiques à la fréquence 50 Hz, (1 000 μ T, cf. rapport d'expertise § 4.3.2), seules les publications scientifiques impliquant des modèles expérimentaux exposés à des valeurs inférieures ou égales à cette valeur ont été considérées dans l'expertise.

Chaque étude identifiée a été analysée *a minima* par deux experts : la partie de l'étude concernant le protocole d'exposition par un expert physicien, et la partie sur les effets sanitaires par des experts épidémiologistes ou biologistes, en fonction de la nature de l'étude. Chaque expert relecteur a renseigné une grille de lecture, avec l'aide du coordinateur scientifique de l'Anses, en s'appuyant sur différents critères d'analyse définis au préalable. Un tableau d'analyse des études a été construit, recensant notamment les principaux résultats des publications, les commentaires des experts rapporteurs sur les méthodologies (exposition et expérimentation notamment), les conclusions avancées par les auteurs et les sources de financement de chaque étude. Dans tous les cas, c'est la qualité de l'étude, c'est-à-dire la pertinence et la rigueur de son protocole et de l'analyse des résultats par les auteurs (analyses statistiques notamment), qui a motivé son inclusion dans l'évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié, indépendamment de son résultat.

Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires à partir des publications postérieures à 2010

Pour chaque effet sanitaire, l'ensemble des études disponibles chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'autre part, est considéré à travers des logigrammes spécifiques afin de caractériser les éléments de preuve apportés sur le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses

¹ La norme NF C 18-510 définit les domaines de tension suivants en courant alternatif : la très basse tension inférieure à 50 V, la basse tension entre 50 V et 1 000 V et la haute tension au-dessus de 1 000 V. La haute tension A (HTA) concerne les tensions entre 1 000 V et 50 000 V. La haute tension B (HTB) concerne les tensions au-dessus de 50 000 V. Les termes haute tension et très haute tension sont parfois utilisés notamment par le gestionnaire du transport d'électricité (RTE), pour désigner les lignes à 63 kV et 90 kV (haute tension) et à 225 kV et 400 kV (très haute tension).

fréquences et l'effet sanitaire considéré. En l'absence d'études chez l'animal concernant des effets sanitaires étudiés par ailleurs chez l'Homme, le groupe de travail s'est intéressé aux études *in vivo* et *in vitro* portant sur des effets biologiques ayant une relation indirecte, mais avérée, avec ces effets sanitaires. Par exemple, l'analyse des études portant sur l'influence des champs basses fréquences sur le stress génotoxique, ou le stress oxydant, a été intégrée dans l'analyse de l'effet cancérigène des champs basses fréquences. La présence de mutations et l'oxydation de l'ADN est en effet retrouvée dans de nombreuses tumeurs.

La méthode d'évaluation des niveaux de preuve mobilisée pour l'expertise se réfère aux travaux antérieurs de l'Anses, notamment l'expertise « exposition aux radiofréquences et santé des enfants », publiée en 2016. Elle s'appuie également sur les travaux du groupe de travail « méthodologie d'évaluation des risques » publiés en 2016. La méthode a cependant été revue et adaptée par le groupe de travail pour intégrer les spécificités de cette expertise, et en particulier les éléments de connaissance apportés par les études se référant aux effets biologiques ayant une relation indirecte avec certaines pathologies (cf. paragraphe précédent).

Le niveau de preuve de l'effet étudié chez l'Homme a ensuite été classé, au regard des éléments de preuves précédemment définis, dans une des catégories suivantes :

- effet avéré pour l'Homme ;
- effet probable ou possible pour l'Homme ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet pour l'Homme.

Prise en compte des données scientifiques antérieures à 2010

Enfin, les données publiées avant 2010 sont prises en compte de manière incrémentale pour moduler les classements précédemment définis. L'évaluation globale inclut donc bien tous les éléments d'appréciation et donne lieu, pour chaque effet sanitaire, à une classification finale du niveau de preuve selon les catégories définies ci-dessus.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

Le comité d'experts spécialisé « 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 17 mai 2018 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

■ Caractérisation des expositions

L'évaluation de l'exposition des personnes (population générale et travailleurs) aux champs électromagnétiques basses fréquences consiste à identifier les sources d'exposition dans l'environnement et à quantifier l'exposition aux champs électromagnétiques émis par ces sources. La concomitance et la variabilité de ces multiples sources de champ nécessitent de mettre en œuvre une méthodologie rigoureuse pour caractériser de façon précise l'environnement électromagnétique. De nombreuses études menées dans ce domaine permettent d'avoir aujourd'hui une vision de plus en plus précise de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à laquelle sont soumis la population générale et les travailleurs. Cependant, cet environnement électromagnétique évolue, au regard des innovations prévues dans le domaine du transport de l'électricité, avec les nouveaux réseaux électriques dits « intelligents » (*smart grids*), et avec le développement des véhicules électriques. Ces évolutions pourront avoir un impact sur l'environnement électromagnétique par la multiplication des systèmes de production d'électricité renouvelable décentralisés au plus près des populations et le déploiement de nouvelles technologies (capteurs et réseaux de communications) dans les foyers d'habitation et sur le réseau

électrique lui-même. À l'heure actuelle, aucune étude n'est disponible pour estimer l'évolution de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques basses fréquences dans ces perspectives.

Les études menées en milieu extérieur (espaces publics en milieu urbain), montrent que l'intensité des champs magnétiques basses fréquences varie essentiellement entre 0,05 et 0,2 μT^2 . Des valeurs plus élevées, de l'ordre de quelques microteslas, peuvent être toutefois rencontrées, notamment directement sous des lignes électriques à très haute tension, à proximité immédiate des locaux des transformateurs ou des sous-stations électriques. Dans l'environnement intérieur des habitations, des valeurs élevées de champ magnétique (jusqu'au millitesla) peuvent être mesurées, produites par des appareils domestiques dont certains sont utilisés très près du corps, comme par exemple les sèche-cheveux. Cependant, l'exposition à ces appareils est très brève et très localisée. Les expositions mesurées dans les moyens de transport, tels que les trains et tramways, sont habituellement de l'ordre de quelques microteslas (que ce soit à l'intérieur des voitures ou sur les quais de gare) alors qu'elles sont généralement inférieures à 2 μT dans les véhicules automobiles, indépendamment de la nature de la motorisation (thermique, électrique ou hybride).

Par ailleurs, l'étude réalisée par l'Inserm pour l'Anses sur l'exposition autour des lignes haute tension (HT) et très haute tension (THT) a permis d'estimer le pourcentage de la population exposée en environnement résidentiel sur le territoire métropolitain. Les résultats indiquent, selon les scénarios d'exposition retenus, que 0,28 % et 0,74 % de la population française est exposée à des champs magnétiques respectivement supérieurs à 0,4 μT et 0,1 μT . Environ 0,35 % des enfants de moins de 15 ans (\approx 40 000 enfants) sont exposés à leur domicile à un champ magnétique supérieur à 0,4 μT , avec une importante variabilité selon les régions. Environ 0,18 % des enfants (\approx 8 000) scolarisés dans une école du premier degré fréquentent un établissement scolaire exposé à un champ magnétique supérieur à 0,4 μT .

Les niveaux d'exposition des travailleurs sont très variables selon les postes occupés. Ils peuvent être, dans des situations particulières (par exemple lors de l'utilisation de certaines machines industrielles), supérieurs aux valeurs limites réglementaires (cf. 5.3.3 du rapport d'expertise). De plus, il a été montré, par des simulations numériques, que la densité de courant induit chez le fœtus dans le cas de l'exposition de la mère au travail, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition européennes recommandées pour la population générale³ (100 μT à 50 Hz).

■ **Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez l'Homme**

La méthodologie précédemment décrite a été utilisée pour classer les différents effets potentiels de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez l'Homme. La synthèse des éléments de preuve et les niveaux de preuve associés à chaque effet étudié sont présentés dans le tableau 35 du rapport d'expertise.

² Les valeurs limites d'exposition réglementaires dépendent de la fréquence. Elles sont définies pour des expositions aiguës. À 50 Hz, la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 du conseil de l'Union européenne concernant la population générale préconise une exposition maximale de 100 μT . Le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques fixe une valeur d'action basse à 1 000 μT (cf. 5.3.3 du rapport d'expertise).

³ Les conditions d'exposition d'une femme enceinte au travail sont régies par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. L'exposition du fœtus aux champs électromagnétiques doit être conforme aux prescriptions du décret n°2002-775 du 3 mai 2002, qui concerne la population générale, s'appuyant sur la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 de l'Union européenne.

D'après l'ensemble des données disponibles sur les effets sanitaires de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, les travaux d'expertise collective permettent de conclure à un effet possible de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie infantile, même si les études publiées après 2010 retrouvent moins fréquemment ce lien.

Deux études sur les quatre portant sur la sclérose latérale amyotrophique (SLA) font apparaître un lien entre cette pathologie et le fait d'exercer certaines professions en relation avec l'électricité. Elles présentent néanmoins des limites liées aux incertitudes associées à l'évaluation de l'exposition, qui rendent leur interprétation délicate. Ce lien pourrait être expliqué par différents facteurs d'exposition : champ magnétique, choc électrique, ou encore synergie entre agent physique et chimique, etc. Par ailleurs, deux méta-analyses ont rapporté un lien significatif, mais les biais de publications qu'elles comportent réduisent leur fiabilité. À l'heure actuelle, les données considérées ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences sur la SLA, mais cette question devrait néanmoins faire l'objet de recherches complémentaires.

Concernant les tumeurs du système nerveux central chez l'adulte, deux études suggèrent la possibilité d'un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de gliomes ou de méningiomes. Une étude mentionne une tendance à l'augmentation du risque de méningiome à la limite de la significativité, et une autre étude ne retrouve pas de lien. À l'heure actuelle, les résultats des études disponibles sont trop hétérogènes pour conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences ; d'autres études sont donc nécessaires dans ce domaine.

Il en est de même en ce qui concerne les études sur la maladie d'Alzheimer (ou plus généralement les démences), deux études et une méta-analyse trouvent un excès de risque de démence associé à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Cependant, l'hétérogénéité des résultats et la probabilité de biais de publication ne permettent pas à ce jour de conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Par ailleurs, l'ensemble des données considérées ne permet pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences sur :

- les tumeurs du système nerveux central chez l'enfant ;
- le cancer du sein ; ce lien avait été mis en évidence par l'étude d'Erren *et al.*, (2001) mais les études menées ultérieurement ne confirment pas cette association ;
- les hémopathies malignes chez l'adulte ;
- les autres cancers de l'adulte ;
- la maladie de Parkinson.

Certaines études expérimentales chez l'Homme et l'animal mettent en évidence une possible interférence entre l'exposition à des champs magnétiques à des niveaux faibles (de l'ordre du microtesla), et l'activité électrique cérébrale. On peut noter une certaine similitude entre ces résultats et ceux de l'expertise « radiofréquences et santé » publiée par l'Anses en 2013, qui notaient « une modification de l'activité électrique cérébrale (notamment de la puissance du rythme alpha) » après exposition aux radiofréquences. Des études complémentaires doivent être réalisées d'une part pour confirmer ces résultats, et d'autre part pour étudier les possibles conséquences physiopathologiques.

■ Recommandations en matière d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Concernant la métrologie

La traçabilité et la fiabilité des mesures de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences restant un enjeu très important dans l'évaluation de l'exposition, le CES reprend la recommandation exprimée en 2010 par l'Afsset 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.

Le CES recommande également que les demandes de mesures d'exposition formulées par les services publics (préfectures, mairies, etc.) soient confiées à des acteurs pouvant répondre de capacités techniques prouvées concernant la réalisation de ces mesures, comme par exemple à travers une accréditation de type Cofrac.

Concernant l'exposition de la population générale

Considérant :

- le développement de nouvelles sources d'exposition liées à la production décentralisée de l'énergie, avec des sources de production de plus en plus proches des individus ;
- le développement important de nouvelles technologies consommatrices d'énergie (par exemple *data centers*) impliquant de nouvelles sources d'exposition potentiellement concentrées ;
- le manque de données sur certaines sources d'exposition identifiées (véhicules, transports publics, transformateurs, etc.) ;
- la multiplicité des sources d'exposition de la population générale, notamment en milieu urbain (lignes enterrées, signalisation, transports collectifs, etc.) ;

le CES recommande :

- de caractériser l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences spécifiquement liée aux postes de transformation électrique, notamment ceux situés près des lieux recevant du public, des habitations ou des lieux de travail ;
- d'évaluer l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques basses fréquences en milieu urbain, qui concentre une diversité de sources de champs électromagnétiques basses fréquences (lignes de transport aériennes et enterrées, transports collectifs, postes de transformation, etc.) ;
- d'évaluer, lorsque cela est techniquement possible, en amont de la mise en place d'une nouvelle technologie, l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences des futurs utilisateurs grâce à des techniques de modélisation ;
- de faciliter, pour les particuliers, les demandes de caractérisation de leur environnement électromagnétique par un laboratoire accrédité. Il s'agirait, par exemple, d'étendre aux basses fréquences « le dispositif national de mesure des champs électromagnétiques » de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

Concernant l'exposition en milieu de travail :

Considérant les niveaux de champs très différents auxquels les travailleurs peuvent être soumis selon leur métier, le CES souligne toute la pertinence du décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus à l'exposition aux champs électromagnétiques, imposant notamment à l'employeur de caractériser l'environnement électromagnétique des postes de travail. Le CES souligne également l'intérêt de l'action coordonnée de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), des Caisses d'assurance retraite et de santé au travail (Carsat) et de la Caisse régionale d'assurance maladie d'Île de

France (Cramif) visant à recenser les équipements industriels les plus exposants et à mesurer les niveaux d'exposition associés à leur utilisation.

Considérant les niveaux de champ magnétique très élevés auxquels certains groupes de travailleurs sont exposés, et compte-tenu des incertitudes au sujet d'un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de certains effets sanitaires (tels que sclérose latérale amyotrophique et tumeurs du système nerveux central) chez les travailleurs exposés de façon chronique à des hauts niveaux de champ, le CES recommande :

- que les constructeurs de machines industrielles émettant des champs électromagnétiques basses fréquences (*a minima* celles faisant partie des 7 catégories de machines les plus exposantes mises en évidence par l'INRS) mesurent l'exposition associée à des conditions nominales de fonctionnement et d'utilisation de ces appareils et l'indiquent sur la fiche technique de la machine ;
- qu'un recueil de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques soit mis en place dans le suivi médical du personnel, tout le long de sa carrière, de façon inter-entreprise, de manière à permettre un suivi longitudinal de l'exposition professionnelle.

Concernant l'exposition des femmes enceintes

Considérant :

- l'article R. 4152-7-1⁴ du Code du travail ;
- que la densité de courant électrique induit chez le fœtus, dans certains scénarios d'exposition, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition recommandées (recommandation européenne 1999/519/CE) pour la population générale (100 µT à 50 Hz) lorsque la mère est exposée à ces valeurs ;

le CES recommande ;

- de diffuser cette information auprès des employeurs, des préventeurs, des médecins du travail et des services de santé au travail ;
- qu'à leur tour, les employeurs et les médecins du travail informent les femmes de l'existence de dispositions réglementaires qui prévoient l'aménagement de leur poste de travail lorsqu'elles sont enceintes, pour limiter l'exposition du fœtus aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Concernant les valeurs limites d'exposition réglementaires

Considérant :

- que les expérimentations *in vivo* et *in vitro* ont mis en évidence la possibilité d'effets biologiques (stress oxydant, effets génotoxiques, effets sur la physiologie cellulaire) liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à des niveaux de l'ordre du millitesla ;
- que certaines catégories de travailleurs sont exposées à de tels niveaux de champ magnétique ;
- que le résultat de certaines études épidémiologiques met en évidence une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et certaines

⁴ « Art. R. 4152-7-1. - Lorsque, dans son emploi, la femme enceinte est exposée à des champs électromagnétiques, son exposition est maintenue à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes, et en tout état de cause à un niveau inférieur aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques. »

pathologies pour une exposition professionnelle (SLA, tumeurs du système nerveux central) ;

- les résultats des études dosimétriques sur l'exposition du fœtus ;

le CES recommande qu'une prochaine réévaluation des valeurs limites d'exposition prenne en compte tous les éléments scientifiques à disposition, notamment les plus récents, incluant les études épidémiologiques et les études *in vivo* et *in vitro* portant sur les effets biologiques.

Concernant l'urbanisme

Considérant l'augmentation potentielle de l'incidence de leucémies infantiles à proximité des lignes à haute tension, et malgré l'absence de preuve d'un lien de causalité direct entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de leucémie infantile, le CES souligne la pertinence de l'instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité⁵. Celle-ci recommande « d'éviter, dans la mesure du possible, de décider ou d'autoriser l'implantation de nouveaux établissements sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, maternelles, écoles primaires etc.) dans les zones qui, situées à proximité d'ouvrages THT, HT, lignes aériennes, câbles souterrains et postes de transformation ou jeux de barres, sont exposées à un champ magnétique de plus de 1 µT ».

- **Recommandations en matière d'études et de recherches sur l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et sur les effets biologiques et sanitaires potentiellement liés à cette l'exposition**

Concernant l'exposition

Considérant les résultats d'études de simulations numériques sur la femme enceinte et le fœtus, le CES recommande la poursuite des études de modélisation de l'exposition au cours de la grossesse.

Considérant que les études toxicologiques sont menées sur des périodes d'exposition courtes, alors que la population ou les travailleurs sont généralement exposés à long terme aux champs électromagnétiques basses fréquences, le CES recommande de développer un indicateur d'exposition cumulée dans l'optique de réaliser des études toxicologiques vie entière.

Concernant les effets biologiques et sanitaires

D'un point de vue général, le CES recommande vivement la constitution de cohortes de travailleurs exposés ou non exposés, ou la pérennisation de cohortes existantes, pour étudier en épidémiologie le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de pathologies.

Considérant par ailleurs :

- que le nombre de sujets fortement exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences dans la population générale est faible, induisant une faible puissance statistique des études épidémiologiques s'intéressant aux lignes à haute tension ;
- que l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de pathologies, si elle existe, est faible ;

Le CES recommande,

- d'étudier des populations exposées ou potentiellement exposées aux niveaux les plus élevés de champs électromagnétiques basses fréquences telles que certaines catégories

⁵ http://circulaires.legifrance.gouv.fr/pdf/2013/04/cir_36823.pdf.

de professionnels ou les personnes habitant à proximité des postes de transformation (cf. étude multicentrique *Transexpo*⁶). Une attention toute particulière doit être portée aux personnes (enfants ou professionnels) qui habitent ou travaillent à proximité des postes de transformation et qui y sont exposées pendant la journée (que ce soit dans le cadre de leur fréquentation de crèches ou d'écoles ou de leur activité professionnelle).

Le CES souligne l'importance de disposer des adresses précises des résidences des sujets dans les registres de pathologies et leur géolocalisation, pour permettre d'étudier les effets sanitaires liés à des expositions environnementales. Il recommande de faciliter leur mise à disposition dans le cadre de recherches.

Leucémie infantile

Considérant :

- que l'association entre l'exposition aux basses fréquences et l'apparition de leucémies infantiles a été mise en évidence dans des études épidémiologiques ayant estimé l'exposition aux champs électromagnétiques par la distance aux lignes ;
- que cette association n'a pas été retrouvée dans les études épidémiologiques qui estimaient l'exposition par modélisation ou à l'aide de mesures de champ magnétique, études de puissance statistique limitée ;
- l'absence de mécanisme d'action biologique identifié pouvant expliquer l'association épidémiologique ;

le CES recommande :

- de privilégier les analyses poolées, notamment pour les études basées sur des mesures directes de champs magnétiques ;
- d'encourager la recherche en épidémiologie sur les effets de l'exposition des champs électromagnétiques basses fréquences en tenant compte des co-expositions éventuelles (comme par exemple les polluants émis par le trafic routier) ;

Considérant les incertitudes scientifiques persistantes concernant la relation entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences et l'augmentation du risque de leucémies infantiles ;

le CES recommande :

- d'encourager l'utilisation de modèles animaux⁷ de leucémie lymphoblastique aiguë, notamment par la mise au point des modèles murins de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs électromagnétiques basses fréquences ;

⁶ L'étude Transexpo est une étude épidémiologique internationale dont l'objectif est d'évaluer l'association entre l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'incidence de leucémie infantile. Elle consiste à étudier un échantillon d'enfants vivant dans des bâtiments comportant un transformateur moyenne tension / basse tension. L'intérêt de l'étude est sa capacité à sélectionner des sujets malades et non malades vivant dans le même immeuble et évaluer l'exposition à partir de la localisation du lieu de résidence sans requérir la participation des sujets. L'étude proposée permet ainsi d'éviter des biais de sélection des témoins ou de participation.

⁷ L'altération de la structure d'un ou plusieurs gènes peut entraîner une prédisposition à développer une maladie particulière. Ainsi, certains animaux sont génétiquement modifiés pour être prédisposés à développer une pathologie. Ils peuvent de ce fait être utilisés pour analyser l'influence de facteurs environnementaux dans l'induction de la pathologie.

- d'étudier l'implication possible d'un facteur tiers dont la toxicité est établie (agents génotoxiques, co-cancérogène, etc.) dans l'optique de comprendre expérimentalement la relation entre champs magnétiques basses fréquences et la survenue de leucémies de l'enfant.

Méningiomes

Considérant les résultats hétérogènes sur le lien entre une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de méningiome, le CES recommande la poursuite des études épidémiologiques, en particulier chez les travailleurs.

Mélanome oculaire

Considérant :

- l'unique étude d'envergure ayant rapporté un lien entre l'exposition professionnelle aux basses fréquences et la survenue de mélanome oculaire ;
- l'absence de prise en compte de certains facteurs de confusion et le mode de recueil des données imprécis de cette étude ;
- la faible incidence de cette pathologie dans la population (500 cas par an en France) ;

le CES recommande de mener une étude internationale et/ou une étude poolée afin de confirmer ou infirmer ce résultat.

Sclérose latérale amyotrophique (SLA)

Considérant :

- la mise en évidence, par quelques études épidémiologiques, d'une association entre SLA et exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez les travailleurs ;
- le manque de données sur l'exposition chronique des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences ;
- la mise en évidence de certains effets biologiques (stress oxydant) à des niveaux d'exposition de l'ordre du millitesla possiblement rencontrés chez certains travailleurs ;
- que ces effets biologiques retrouvés concernent principalement le stress oxydant, et qu'un modèle murin de SLA existant est un modèle impliquant une enzyme de la balance oxydative (mutation de la superoxyde dismutase) ;

le CES recommande

- en priorité de poursuivre la recherche sur la SLA, notamment avec des modèles murins spécifiques de cette pathologie ;
- l'enregistrement systématique et continu des cas de SLA afin d'encourager la recherche grâce à un registre de population documentant notamment l'histoire professionnelle (comme le registre irlandais des maladies du motoneurone, incluant la SLA, mais aussi la sclérose latérale primitive ou encore la maladie de Kennedy) ;
- de poursuivre la réalisation d'études épidémiologiques en milieu professionnel ;
- d'évaluer la part relative du risque pour les travailleurs liée à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et celle liée aux chocs électriques potentiellement subis.

Démences et maladie d'Alzheimer

Considérant :

- les résultats non homogènes concernant l'apparition de maladie d'Alzheimer ;
- l'association observée dans deux études entre une exposition professionnelle aux basses fréquences et l'apparition de démences ;
- que cette association était plus significative chez les travailleurs ayant subi des chocs électriques ;
- que certains troubles cognitifs ont été mis en évidence chez des animaux exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences ;

le CES recommande :

- l'étude d'autres types de démences que la maladie d'Alzheimer (démence fronto-temporale, démence à corps de Levy, démence vasculaire, etc.) ;
- d'évaluer la part relative du risque pour les travailleurs liée à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et celle liée aux chocs électriques potentiellement subis.

Étude du fonctionnement cérébral

Considérant certaines études qui mettent en évidence :

- des modifications des capacités de mémoire et des niveaux d'anxiété et d'émotion chez l'animal après l'exposition aux champs basses fréquences ;
- une modification de la plasticité cérébrale et de la neurogenèse après l'exposition aux champs basses fréquences ;
- la perturbation des potentiels évoqués (signaux EEG de très faible intensité) en réponse à l'exposition aux champs basses fréquences chez l'Homme ou l'animal ;

le CES recommande :

- de poursuivre la recherche dans ces domaines, afin de confirmer ou non ces résultats ;
- d'approfondir les connaissances sur les mécanismes biologiques potentiellement impliqués ;
- d'évaluer les conséquences pathologiques potentielles de ces effets sur les populations juvéniles et les adultes.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

La présente expertise a rassemblé les connaissances disponibles sur les expositions aux champs électromagnétiques basses fréquences et leurs effets biologiques et sanitaires éventuels. Afin d'évaluer le niveau de preuve des effets sanitaires rapportés dans la littérature, les principes méthodologiques exposés dans le rapport de l'Anses sur l'exposition aux radiofréquences et la santé des enfants (Anses, 2016) ont été repris et adaptés (recensement des articles de la littérature scientifique, analyse des publications et détermination des éléments de preuve).

Concernant la connaissance des expositions, l'Anses a cherché à combler le manque d'information disponible en exploitant des études menées notamment en milieu professionnel, et

en menant des travaux originaux pour améliorer la caractérisation de l'environnement électromagnétique des individus en milieu résidentiel.

Cependant, l'environnement électromagnétique évolue, par exemple avec le développement des énergies renouvelables et la décentralisation de la production de l'électricité au plus près des consommateurs, modifiant ainsi la répartition spatiale des sources de champs électromagnétiques. À l'heure actuelle, l'évolution de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques basses fréquences que pourraient induire ces changements n'est pas documentée.

L'Anses reprend l'ensemble des conclusions et recommandations, émises par le Comité d'experts spécialisés « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Elle précise et complète ci-dessous les recommandations visant à faire évoluer le cadre réglementaire en matière d'urbanisme et de valeurs limites d'exposition, maîtriser l'exposition en milieu professionnel, et améliorer les connaissances sur le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et certaines pathologies.

■ **Renforcer et adapter la réglementation sur les valeurs limites d'exposition**

Des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques sont proposées dans la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 de l'Union européenne, qui n'est, par définition, pas contraignante. L'arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique ne définit des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques qu'à proximité des lignes à haute tension. Les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences de la population ne sont donc soumis, en France, à aucune réglementation, hormis à proximité des lignes de transport et de distribution d'électricité.

Par conséquent, l'Anses recommande d'étendre le cadre réglementaire existant pour les lignes de transport d'électricité à l'ensemble des situations d'exposition de la population générale.

■ **Renforcer la réglementation en matière d'urbanisme**

En 2010, l'Anses notait la cohérence des résultats des études épidémiologiques qui montraient une association statistique entre la survenue de leucémie infantile et l'exposition résidentielle aux champs magnétiques basses fréquences, dont les niveaux, moyennés sur 24 h, étaient supérieurs à 0,2 μ T ou 0,4 μ T, selon les études. Les résultats de la présente expertise sont toujours en accord avec cette conclusion.

L'instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité a recommandé aux gestionnaires d'établissements et aux autorités compétentes en matière d'urbanisme de ne pas implanter de nouveaux établissements sensibles dans des zones exposées à un champ magnétique supérieur à 1 μ T.

Une étude menée par l'Inserm pour l'Anses a permis de quantifier la part de la population française, et plus spécifiquement les enfants, exposée à de tels niveaux de champs, liés à la proximité du lieu de résidence ou de l'école fréquentée avec des lignes à haute et très haute tension. Les résultats indiquent, selon le scénario d'exposition retenu, qu'environ 0,35 % (respectivement 0,56 %) des enfants de moins de 15 ans sont exposés à leur domicile à un champ magnétique supérieur à 0,4 μ T (respectivement 0,2 μ T). Environ 0,18 % (0,29 %) des enfants scolarisés dans une école du premier degré fréquentent un établissement scolaire exposé à un champ magnétique supérieur à 0,4 μ T (0,2 μ T).

Dans ce contexte, l'Agence renouvelle ses recommandations formulées en 2010 visant à ne plus augmenter, par précaution, le nombre de personnes sensibles exposées autour des lignes de transport d'électricité à très haute tension et de limiter les expositions. Dans cet objectif, l'Agence préconise que l'instruction du 15 avril 2013 soit intégrée dans la réglementation.

■ Maîtriser l'exposition en milieu professionnel

Une étude menée par l'Institut national de recherche et de sécurité et les Caisses d'assurance retraite et de santé au travail a montré que certains professionnels peuvent être exposés à des niveaux de champs très élevés, potentiellement supérieurs aux valeurs limites définies dans le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 qui transpose la Directive européenne 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

L'Anses souligne l'importance :

- de faire appliquer ces dispositions réglementaires en matière d'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques, introduites par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016. Afin d'évaluer les risques liés aux champs électromagnétiques, des outils spécifiques d'aide à la caractérisation des expositions professionnelles sont disponibles (par exemple Oseray⁸) ;
- de réduire les situations de surexposition, par exemple en adaptant les postes de travail.

En complément, l'Agence recommande que les constructeurs de machines industrielles émettant des champs électromagnétiques basses fréquences (a minima celles faisant partie des sept catégories de machines les plus exposantes mises en évidence par l'INRS) mesurent l'exposition associée à des conditions nominales de fonctionnement et d'utilisation de ces appareils et l'indiquent sur la fiche technique de la machine.

À ce même sujet, elle recommande aux autorités publiques d'examiner la pertinence des directives européennes applicables à ces machines, afin de les faire compléter, en tant que de besoin, pour prendre en compte ces aspects et de les inclure dans le processus conduisant au marquage CE.

Par ailleurs, considérant que, lorsqu'une femme enceinte est exposée à une intensité de champ magnétique correspondant aux valeurs limites maximales d'exposition pour les travailleurs, la densité de courant électrique induit chez le fœtus, dans certains scénarios d'exposition, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition européennes recommandées pour le grand public, l'Anses recommande :

- de diffuser cette information auprès des employeurs et des médecins du travail ;
- qu'à leur tour, les employeurs, préventeurs, les médecins du travail et les services de santé au travail informent les femmes de l'existence de dispositions réglementaires qui prévoient l'aménagement de leur poste de travail lorsqu'elles sont enceintes, pour limiter l'exposition du fœtus aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Enfin, les résultats de cette expertise montrent que des effets biologiques (stress oxydant, effets génotoxiques, effets sur la physiologie cellulaire) surviennent à des niveaux d'exposition autour des valeurs déclenchant l'action définies dans le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016. De plus, certaines études épidémiologiques mettent en évidence un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de certains effets sanitaires (maladies neurodégénératives et tumeurs du système nerveux central). L'Anses recommande donc d'évaluer la pertinence des fondements scientifiques à l'origine des valeurs limites d'exposition.

⁸ OSERAY est une application permettant d'accompagner l'employeur dans le cadre de sa démarche d'évaluation des risques dus aux rayonnements électromagnétiques. <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil61>.

■ **Poursuivre les recherches concernant le risque éventuel de pathologies associées à l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences**

Compte tenu des incertitudes persistantes sur le lien entre l'exposition aux champs magnétiques et la leucémie infantile, l'Anses recommande de poursuivre la recherche :

- sur les populations les plus exposées, en favorisant par exemple le financement et la mise en œuvre de l'étude Transexpo, qui s'intéresse aux logements situés à proximité des transformateurs ;
- en améliorant l'évaluation de l'exposition dans les études épidémiologiques, en combinant par exemple des mesures de terrain et des modélisations.

En milieu professionnel, considérant les incertitudes associées aux données récentes suggérant une association entre l'exposition aux basses fréquences et l'apparition de tumeurs cérébrales ou de maladies neurodégénératives telles que la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique, un lien de causalité ne peut être établi.

L'Anses recommande donc d'encourager la recherche en épidémiologie en milieu professionnel sur ces effets sanitaires.

Dr Roger Genet

MOTS CLES

Champs électromagnétiques, basses fréquences, leucémies, exposition, électricité, enfants, leucémie infantile, sclérose latérale amyotrophique

Electromagnetic Fields, Extremely Low Frequencies, Leukemia, Exposure, Electricity, Children, childhood leukemia, amyotrophic lateral sclerosis

Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

**Saisine n° 2013-SA-0038
Saisine liée n° 2013-SA-0037**

RAPPORT d'expertise collective

**Comité d'experts spécialisé : « Agents physiques, nouvelles technologies et grands
aménagements »**

Groupe de travail : « Champs électromagnétiques basses fréquences »

Mai 2018

Mots clés

Champs électromagnétiques, basses fréquences, leucémies, exposition, électricité, enfants, leucémie infantile, sclérose latérale amyotrophique

Electromagnetic Fields, Extremely Low Frequencies, Leukemia, Exposure, Electricity, Children, childhood leukemia, amyotrophic lateral sclerosis

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Yves LE DRÉAN – Maître de conférences à l'Université de Rennes 1 - Biologie.

Membres

M. Alexandre BOUNOUH – Chef de département au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) – Physique.

M. Olivier DEJARDIN – Docteur en santé publique - Ingénieur de recherche hospitalier (CHU de Caen - Inserm U1086 ANTICIPE université de Caen Basse Normandie) – Épidémiologie.

M. Jean DEMARQUOY – Professeur des universités, université de Bourgogne – Physiologie, physiologie métabolique.

Mme Shaïela KANDEL – Conseillère indépendante en gestion du risque et réglementation – Évaluation des risques, réglementation.

Mme Brigitte LACOUR – Médecin épidémiologiste, Directrice du Registre national des tumeurs solides de l'enfant, chercheur au sein de l'équipe EPICEA, Inserm U1153 – Médecine, épidémiologie.

M. György THUROCZY – Chef du département « Radiations non ionisantes » à l'Institut national de santé publique, Budapest, Hongrie – Physique.

RAPPORTEURS

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

- **Mandat 2014 - 2017**

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres

Alexandre BOUNOUH – Chef de Département au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

- **Mandat 2018 – 2020**

Présidente

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg.

Membres

Thomas CLAUDEPIERRE – Enseignant chercheur à l'université de Lorraine.

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Jack FALCON – Chercheur émérite au Museum d'histoire naturelle, Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

François GAUDAIRE – Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Irina GUSEVA-CANU - Professeur d'épidémiologie à l'université de Lausanne, Responsable adjointe du Pole Recherche et enseignement Santé, Institut universitaire romand de santé au travail

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Chaker LARABI – Enseignant chercheur à l'université de Poitiers.

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Valérie SIMONNEAUX – Chercheuse en neurobiologie des rythmes au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en ophtalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Françoise VIENOT - Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle, Responsable de l'équipe « Vision, lumière et apparence » au Centre de recherche sur la conservation des collections (CRCC).

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Olivia ROTH-DELGADO – Chef de projets scientifiques – Anses.

Contribution scientifique

Olivia ROTH-DELGADO – Chef de projets scientifiques – Anses.

Olivier MERCKEL – Chef d'unité – Anses.

Secrétariat administratif

Sophia SADDOKI – Assistante de l'unité « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » - Anses.

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Les personnes mentionnées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) ont été invitées par le groupe de travail à échanger sur des points particuliers du sujet d'expertise.

Les experts du groupe de travail remercient l'ensemble des personnes consultées pour les échanges fructueux qui ont eu lieu dans le cadre des auditions. Les informations transmises dans ce cadre ont été analysées par les experts du groupe de travail et prises en compte lors de l'élaboration du rapport.

Avertissement : la mention des personnes ci-dessous ne signifie pas qu'elles endossent les conclusions du présent rapport.

Tableau 1 : liste des personnes auditionnées

Date d'audition	Organisme	Nom	Fonction et spécialité
15 décembre 2016	Inserm	Jacqueline CLAVEL	Directrice de l'équipe d'épidémiologie des cancers de l'enfant, CRESS, UMRS 1153, Inserm, Université Paris Descartes. Directrice du registre national des hémopathies malignes de l'enfant
9 mars 2017	INRS	Manu (Patrice) DONATI	Responsable du Laboratoire Électromagnétisme Vibration Optique, Département ingénierie des équipements de travail
		Patrick MOUREAUX	Expert assistance et conseil, rayonnements ionisants, non ionisants et optiques - Département expertise et conseil technique
6 avril 2017	Renault	Florence ROWE	Chef de service des technologies de l'électronique
		Patrick STAEBLER	Consultant expert en champ électromagnétiques
6 avril 2017	RTE	François DESCHAMPS	Chargé de mission Expert - département concertation en environnement
		Claire GRANDET	Directrice du département concertation en environnement
		Delphine PINCEMAILLE	Juriste - Droit de l'énergie et de l'environnement
6 avril 2017	PSA	Virginie CAVEL	Ressources Humaines – Animation Système de Management de la Sécurité et la Santé au Travail
		Ariel LECCA	Maitre Expert en Compatibilité Electromagnétique
		Marco KLINGLER	Expert en Compatibilité Electromagnétique
22 juin 2017	Criirem	Catherine GOUHIER	Secrétaire de l'association Criirem
4 juillet 2017	Enedis	Isabelle MAGNE	Ingénieur chercheur à EDF R&D

		Michel LUTUN	Consultant en Prévention Santé Sécurité
--	--	--------------	--



SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	13
➤ <i>Leucémie infantile</i>	22
➤ <i>Méningiomes</i>	22
➤ <i>Mélanome oculaire</i>	22
➤ <i>Sclérose latérale amyotrophique (SLA)</i>	23
➤ <i>Démences et maladie d'Alzheimer</i>	23
➤ <i>Étude du fonctionnement cérébral</i>	24
Sigles et abréviations	25
Liste des tableaux	28
Liste des figures	29
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	31
1.1 Contexte.....	31
1.2 Objet de la saisine.....	32
1.3 Limites du champ d'expertise.....	32
1.4 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	32
1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	33
2 Méthodologie d'expertise	34
2.1 Analyse des réglementations par pays.....	34
2.2 Analyse de la bibliographie scientifique.....	34
2.2.1 Recensement des articles scientifiques.....	34
2.2.1.1 Période de référence.....	34
2.2.1.2 Moteurs de recherche	35
2.2.1.3 Typologie des documents expertisés	35
2.2.1.4 Priorisation	35
2.2.1.4.1 En fonction des effets sanitaires.....	35
2.2.1.4.2 En fonction des conditions d'exposition.....	36
2.2.1.5 Mots clés utilisés	36
2.2.2 Analyse des publications	37
2.2.2.1 Une analyse collective.....	37
2.2.2.2 Critères de qualité retenus pour l'analyse des études.....	37
2.2.2.2.1 Critères de qualité des études épidémiologiques.....	37
2.2.2.2.2 Critères de qualité dans les études sur les modèles cellulaires ou animaux.....	38
2.2.2.2.3 Critères de qualité dans les études d'exposition	39
2.2.2.2.4 Critères de qualité dans les études dosimétriques	39
2.3 Auditions.....	39
2.3.1 Objectif des auditions.....	39
2.3.2 Préparation et déroulement des auditions	39
2.3.3 Traitement et utilisation des informations obtenues	40
2.3.4 Personnes auditionnées	40
2.4 Évaluation de la proportion de la population française habitant à proximité de lignes de transport d'électricité et de la proportion d'enfants fréquentant des écoles également à proximité de ces lignes.	40
2.5 Évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié	40
2.5.1 Évaluation des éléments de preuves pour les études chez l'Homme	40
2.5.2 Évaluation des éléments de preuves pour les études expérimentales	42

2.5.3	Évaluation globale.....	45
3	Expertises des instances nationales et internationales	48
3.1	Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (2010)	48
3.2	Rapports du conseil scientifique du SSM (2013-2016).....	49
3.3	Efhran 2012.....	50
3.4	Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (Scenih - 2015) .	51
3.5	Demande d'approfondissement de l'expertise scientifique relative aux conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques.....	52
3.6	Conclusions sur les expertises réalisées par d'autres organismes	53
4	État des lieux de la réglementation	54
4.1	Méthode de construction des valeurs limites d'exposition	54
4.1.1	Les restrictions de base	54
4.1.2	Les niveaux de référence.....	56
4.1.3	Comparaison des restrictions de base et des niveaux de référence des lignes directrices de l'Icnirp 1998 et 2010.....	58
4.2	Réglementations sur l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à travers le monde	59
4.2.1	Contexte.....	59
4.2.2	Réglementations nationales pour la protection du public.....	59
4.2.2.1	Absence de réglementation nationale ou contraintes minimales.....	60
4.2.2.2	Adoption volontaire de lignes directrices internationales, sans application	60
4.2.2.3	Transposition des lignes directrices internationales dans la législation.....	60
4.2.2.4	Réglementation plus stricte que les lignes directrices internationales.....	60
4.2.2.5	Réglementation basée sur le principe de précaution.....	60
➤	<i>Limites tenant compte du principe de précaution</i>	<i>61</i>
➤	<i>Autres formes de principe de précaution.....</i>	<i>62</i>
4.3	France	66
4.3.1	Réglementation concernant la population générale	66
4.3.2	Réglementation concernant la population professionnelle	66
5	Caractérisation des expositions	68
5.1	Méthodes d'évaluation de l'exposition	68
5.2	Exposition de la population générale	69
5.2.1	Sources d'exposition.....	69
5.2.1.1	Les lignes de transport et de distribution d'électricité.....	69
5.2.1.2	Transformateurs électriques.....	71
5.2.1.3	Les sources en environnement résidentiel	72
5.2.1.4	Transports : voiture, trains, etc.....	72
5.2.2	Synthèse bibliographique sur l'exposition de la population	73
5.2.2.1	Exposition à l'extérieur des bâtiments	73
5.2.2.2	Exposition liée aux transformateurs intérieurs.....	73
5.2.2.3	Exposition à l'intérieur des bâtiments	74
5.2.2.4	Exposition liée aux transports.....	76
5.2.3	Données issues du rapport du CSTB « Quantification de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'intérieur des bâtiments ».....	79
5.2.4	Analyse des données de mesures issues du dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques.....	79

5.2.4.1	Contexte réglementaire	79
5.2.4.2	Méthodologie.....	80
5.2.4.3	Résultats	80
5.2.5	Évaluation du nombre d'habitants et d'écoliers à proximité des lignes à haute tension sur l'ensemble du territoire français.....	81
5.2.5.1	Objectif	81
5.2.5.2	Méthode	81
➤	<i>Descriptif des données utilisées : lignes HT / THT et scénarios d'exposition</i>	81
➤	<i>Méthodologie d'estimation du nombre de personnes à proximité des lignes HT / THT</i>	83
➤	<i>Méthodologie d'estimation du nombre d'enfants à proximité d'une ligne HT / THT</i>	83
5.2.5.3	Résultats	84
➤	<i>Estimation du nombre de personnes vivant à proximité d'une ligne HT / THT en France</i>	84
➤	<i>Estimation du nombre d'écoles à proximité d'une ligne HT / THT en France</i>	85
5.2.5.4	Conclusion	85
5.3	Exposition de la population professionnelle.....	86
5.3.1	Sources d'exposition.....	86
5.3.2	Travailleurs des entreprises de transport et de distribution d'électricité.....	87
5.3.3	Analyse des données d'exposition professionnelle fournies par l'INRS.....	88
5.3.4	Synthèse bibliographique sur l'exposition en milieu professionnel	90
5.4	Cas particulier de l'exposition de la femme enceinte et du fœtus	93
5.4.1	Évaluation dosimétrique et respect des valeurs limites d'exposition de la femme enceinte	93
5.4.2	Évaluation dosimétrique et respect des valeurs limites pour le fœtus	94
5.5	Perspective d'évolution des sources d'exposition.....	95
5.6	Conclusion.....	96
6	Études épidémiologiques	98
6.1	Leucémies de l'enfant.....	98
6.1.1	Exposition des enfants.....	99
6.1.2	Exposition professionnelle des parents	105
6.2	Autres cancers de l'enfant	107
6.3	Cancers de l'adulte	119
6.3.1	Cancer du sein.....	119
6.3.2	Cancers du système nerveux central	121
6.3.3	Hémopathies malignes	122
6.3.4	Autres cancers	123
6.4	Maladies neurodégénératives.....	129
6.4.1	Exposition professionnelle	129
6.4.2	Exposition résidentielle	132
7	Études expérimentales.....	139
7.1	Recherche de mécanismes pouvant expliquer un effet cancérigène	139
7.1.1	Introduction et rappel des conclusions de l'expertise précédente.....	139
7.1.2	Effets génotoxiques	140
7.1.2.1	Introduction sur la notion de stress génotoxique	140
7.1.2.2	Publications sur l'effet génotoxique ou co-génotoxique des champs électromagnétiques basses fréquences	140
➤	<i>Études in vitro</i>	140
➤	<i>Études in vivo</i>	142
➤	<i>Cas des études cliniques</i>	145
7.1.2.3	Conclusions sur l'effet génotoxique.....	147
7.1.3	Effets sur le stress oxydant.....	151

7.1.3.1	Introduction sur la notion de stress oxydant	151
7.1.3.2	Études sur les biomarqueurs du stress oxydant.....	151
➤	Études <i>in vitro</i>	151
➤	Études <i>in vivo</i>	153
7.1.3.3	Conclusion sur l'effet oxydatif.....	156
7.1.4	Effets sur la physiologie cellulaire.....	162
7.1.4.1	Études <i>in vitro</i>	162
7.1.1.1	Études <i>in vivo</i>	166
7.1.1.2	Conclusions sur les effets sur la physiologie cellulaire.....	168
7.2	Effets sur le système nerveux central et périphérique.....	175
7.2.1	Études en relation avec les pathologies cérébrales	175
7.2.1.1	Études en relation avec la maladie d'Alzheimer et les pathologies neurodégénératives.....	175
7.2.1.2	Études en relation avec d'autres pathologies cérébrales.....	178
7.2.2	Études sur l'activité électrique cérébrale	182
7.2.2.1	Rappels et définitions	182
7.2.2.2	Études cliniques sur l'activité du cerveau.....	183
7.2.2.3	Le cas particulier du Neurofeedback.....	183
7.2.2.4	Études sur l'activité cérébrale dans des modèles animaux.....	185
7.2.2.5	Conclusions.....	187
7.2.3	Études sur les tâches cognitives et le comportement	192
7.2.3.1	Études en relation avec la mémoire, l'apprentissage et la plasticité cérébrale sous-jacente	192
7.2.3.2	Effets des ondes sur le comportement (anxiété, locomotion, interactions sociales, agressivité).....	194
7.2.3.3	Conclusion	198
7.2.4	Études en relation avec la plasticité cérébrale	204
7.2.5	Études sur l'horloge circadienne et la mélatonine	206
7.2.6	Effet sur la nociception.....	207
7.3	Autres effets	209
7.3.1	Études sur les os et les dents.....	209
7.3.1.1	Effets des ondes sur les os.....	209
7.3.1.2	Effets des ondes sur les dents	210
7.3.2	Études sur la fonction testiculaire et sur la thyroïde	210
8	Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires potentiellement liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences	212
8.1	Méthodologie de classification du niveau de preuve	212
8.2	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer de l'enfant.....	213
8.2.1	Leucémie de l'enfant.....	213
8.2.2	Autres cancers de l'enfant (système nerveux central).....	214
8.3	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer chez l'adulte	216
8.3.1	Cancer du sein.....	216
8.3.2	Tumeurs du système nerveux central.....	217
8.3.2.1	Exposition professionnelle.....	218
8.3.2.2	Exposition environnementale	219
8.3.3	Hémopathies malignes chez l'adulte.....	220
8.3.4	Autres cas de cancer chez l'adulte	222
8.4	Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les maladies neurodégénératives.....	223
8.4.1	Sclérose latérale amyotrophique	224
8.4.1.1	Exposition professionnelle.....	224
8.4.1.2	Exposition résidentielle.....	226

8.4.1.3	Conclusion sur la SLA	227
8.4.2	Démences	227
8.4.3	Maladie de Parkinson	229
9	Conclusions du groupe de travail	234
10	Recommandations du groupe de travail	236
10.1	Recommandations en matière d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences	236
10.2	Recommandations en matière d'études et de recherches sur les effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques basses fréquences	238
10.2.1	Exposition	238
10.2.2	Épidémiologie	238
10.2.2.1	Population	238
10.2.2.2	Travailleurs	239
10.2.3	Effets biologiques	240
11	Bibliographie	242
11.1	Publications	242
11.2	Normes	263
11.3	Législation et réglementation	263
ANNEXES		265
Annexe 1 : Lettre de saisine		266
Annexe 2 : Rappels de physique		268
Annexe 3 : Estimation de la population dans le bâti résidentiel		269
Annexe 4 : Estimation du nombre d'individus vivant dans des logements à proximité des lignes à haute tension selon les régions et différents scénarios d'exposition ...		271
Scénario 0,1 µT		272
Scénario 0,2 µT		273
Scénario 0,3 µT		274
Scénario 0,4 µT		275

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

« Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » et du groupe de travail « Champs électromagnétiques basses fréquences ».

Présentation de la question posée

L'Anses a été saisie le 27 février 2013 par les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture afin, d'une part, d'approfondir l'expertise scientifique relative aux conséquences sur la santé animale et les performances zootechniques de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et, d'autre part, de réaliser une mise à jour de l'expertise scientifique sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, pour la population générale et les travailleurs.

Contexte scientifique

En 2010, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) a publié un avis, assorti d'un rapport d'expertise, intitulé « synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ». Cette expertise concluait à une forte convergence entre les différentes évaluations des expertises internationales sur de possibles effets sanitaires à long terme, notamment concernant l'association entre l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences et la leucémie infantile.

Plus récemment, l'étude Géocap, dont l'objectif était d'étudier l'influence de différentes expositions environnementales en France sur le risque de cancer de l'enfant, a mis en évidence, chez les enfants âgés de moins de 5 ans, une association statistiquement significative entre le fait d'habiter à moins de 50 m de l'aplomb d'une ligne de transport d'électricité à très haute tension (supérieure à 225 kV) et le risque de développer une leucémie infantile (Sermage-Faure *et al.* 2013).

Dans ce contexte, les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture ont sollicité l'Anses afin de mettre à jour l'expertise sur les effets sanitaires, pour l'Homme et l'animal, liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

En réponse à la demande portant sur la santé animale, l'Anses a publié, en août 2015, un avis et un rapport d'expertise sur les « conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques ». Le présent avis concerne les effets sanitaires chez l'Homme de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Dans le cadre de cette expertise, les champs électromagnétiques « basses fréquences » sont définis par le domaine fréquentiel suivant : $0 \text{ Hz} < f \leq \text{quelques kHz}$.

À noter que les termes « extrêmement basses fréquences » sont utilisés dans la littérature soit comme synonyme de « basses fréquences » soit pour désigner une bande de fréquences plus limitée, comprise entre 0 Hz et quelques Hz.

Organisation de l'expertise et description de la méthode

Expertise collective

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté le groupe de travail « Champs électromagnétiques basses fréquences » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 26 février 2015. Les experts de ce groupe ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de la métrologie et de l'exposimétrie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la physiologie et de la réglementation dans le domaine des champs électromagnétiques.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec 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 ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques via le site internet : <https://www.anses.fr>.

Contributions extérieures

Afin de combler un manque de données dans le domaine de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences de la population française, et des enfants en particulier, une « convention de recherche et développement » (CRD) a été établie avec le laboratoire U1086 ANTICIPE de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) le 29 avril 2016. L'objectif de cette étude était d'une part, d'estimer le nombre de personnes habitant à proximité d'une ligne à haute ou très haute tension¹ en France (≥ 63 kV), et, d'autre part, de dénombrer les établissements d'accueil de jeunes enfants et les écoles du premier degré situés à proximité de ces lignes, et d'en déduire le nombre d'enfants les fréquentant.

Méthode d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires

Pour évaluer le niveau de preuve associé à chaque effet sanitaire, le groupe de travail s'est appuyé sur l'ensemble des données disponibles :

- les résultats et conclusions des expertises antérieures à 2010 réalisées par l'Anses et par des organismes nationaux étrangers et internationaux ;
- l'analyse systématique des études scientifiques publiées depuis 2010.

¹ La norme NF C 18-510 définit les domaines de tension suivants en courant alternatif : la très basse tension inférieure à 50 V, la basse tension entre 50 V et 1 000 V et la haute tension au-dessus de 1 000 V. La haute tension A (HTA) concerne les tensions entre 1 000 V et 50 000 V. La haute tension B (HTB) concerne les tensions au-dessus de 50 000 V. Les termes haute tension et très haute tension sont parfois utilisés notamment par le gestionnaire du transport d'électricité (RTE), pour désigner les lignes à 63 kV et 90 kV (haute tension) et à 225 kV et 400 kV (très haute tension).

Revue et analyse bibliographique des articles publiés depuis 2010

Cette expertise, conformément aux principes méthodologiques en vigueur à l'Anses, est principalement fondée sur l'analyse de la littérature scientifique disponible. La période de référence pour la veille bibliographique s'étend de janvier 2010 à décembre 2015. À noter que certaines publications parues avant 2010 et après 2015 ont été prises en compte, notamment pour compléter l'état de l'art des connaissances relatives aux différents effets sanitaires étudiés.

Compte tenu du nombre très important de publications identifiées par la recherche bibliographique, le groupe de travail a priorisé les travaux à effectuer dans le cadre de cette expertise. Ainsi, après avoir listé de manière exhaustive l'ensemble des effets sanitaires explorés par la littérature scientifique, le groupe de travail a considéré comme prioritaire l'expertise des effets sanitaires suivants : la leucémie de l'enfant, les autres cancers et les maladies neurodégénératives. Par ailleurs, considérant la valeur limite d'exposition réglementaire pour les travailleurs exposés à des champs magnétiques à la fréquence 50 Hz, (1 000 μ T, cf. rapport d'expertise § 4.3.2), seules les publications scientifiques impliquant des modèles expérimentaux exposés à des valeurs inférieures ou égales à cette valeur ont été considérées dans l'expertise.

Chaque étude identifiée a été analysée *a minima* par deux experts : la partie de l'étude concernant le protocole d'exposition par un expert physicien, et la partie sur les effets sanitaires par des experts épidémiologistes ou biologistes, en fonction de la nature de l'étude. Chaque expert relecteur a renseigné une grille de lecture, avec l'aide du coordinateur scientifique de l'Anses, en s'appuyant sur différents critères d'analyse définis au préalable. Un tableau d'analyse des études a été construit, recensant notamment les principaux résultats des publications, les commentaires des experts rapporteurs sur les méthodologies (exposition et expérimentation notamment), les conclusions avancées par les auteurs et les sources de financement de chaque étude. Dans tous les cas, c'est la qualité de l'étude, c'est-à-dire la pertinence et la rigueur de son protocole et de l'analyse des résultats par les auteurs (analyses statistiques notamment), qui a motivé son inclusion dans l'évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié, indépendamment de son résultat.

Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires à partir des publications postérieures à 2010

Pour chaque effet sanitaire, l'ensemble des études disponibles chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'autre part, est considéré à travers des logigrammes spécifiques afin de caractériser les éléments de preuve apportés sur le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'effet sanitaire considéré. En l'absence d'études chez l'animal concernant des effets sanitaires étudiés par ailleurs chez l'Homme, le groupe de travail s'est intéressé aux études *in vivo* et *in vitro* portant sur des effets biologiques ayant une relation indirecte, mais avérée, avec ces effets sanitaires. Par exemple, l'analyse des études portant sur l'influence des champs basses fréquences sur le stress génotoxique, ou le stress oxydant, a été intégrée dans l'analyse de l'effet cancérigène des champs basses fréquences. La présence de mutations et l'oxydation de l'ADN est en effet retrouvée dans de nombreuses tumeurs.

La méthode d'évaluation des niveaux de preuve mobilisée pour l'expertise se réfère aux travaux antérieurs de l'Anses, notamment l'expertise « exposition aux radiofréquences et santé des enfants », publiée en 2016. Elle s'appuie également sur les travaux du groupe de travail « méthodologie d'évaluation des risques » publiés en 2016. La méthode a cependant été revue et adaptée par le groupe de travail pour intégrer les spécificités de cette expertise, et en particulier les éléments de connaissance apportés par les études se référant aux effets biologiques ayant une relation indirecte avec certaines pathologies (cf. paragraphe précédent).

Le niveau de preuve de l'effet étudié chez l'Homme a ensuite été classé, au regard des éléments de preuves précédemment définis, dans une des catégories suivantes :

- effet avéré pour l'Homme ;
- effet probable ou possible pour l'Homme ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet pour l'Homme.

Prise en compte des données scientifiques antérieures à 2010

Enfin, les données publiées avant 2010 sont prises en compte de manière incrémentale pour moduler les classements précédemment définis. L'évaluation globale inclut donc bien tous les éléments d'appréciation et donne lieu, pour chaque effet sanitaire, à une classification finale du niveau de preuve selon les catégories définies ci-dessus.

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « 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 17 mai 2018 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Caractérisation des expositions

L'évaluation de l'exposition des personnes (population générale et travailleurs) aux champs électromagnétiques basses fréquences consiste à identifier les sources d'exposition dans l'environnement et à quantifier l'exposition aux champs électromagnétiques émis par ces sources. La concomitance et la variabilité de ces multiples sources de champ nécessitent de mettre en œuvre une méthodologie rigoureuse pour caractériser de façon précise l'environnement électromagnétique. De nombreuses études menées dans ce domaine permettent d'avoir aujourd'hui une vision de plus en plus précise de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à laquelle sont soumis la population générale et les travailleurs. Cependant, cet environnement électromagnétique évolue, au regard des innovations prévues dans le domaine du transport de l'électricité, avec les nouveaux réseaux électriques dits « intelligents » (*smart grids*), et avec le développement des véhicules électriques. Ces évolutions pourront avoir un impact sur l'environnement électromagnétique par la multiplication des systèmes de production d'électricité renouvelable décentralisés au plus près des populations et le déploiement de nouvelles technologies (capteurs et réseaux de communications) dans les foyers d'habitation et sur le réseau électrique lui-même. À l'heure actuelle, aucune étude n'est disponible pour estimer l'évolution de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques basses fréquences dans ces perspectives.

Les études menées en milieu extérieur (espaces publics en milieu urbain), montrent que l'intensité des champs magnétiques basses fréquences varie essentiellement entre 0,05 et 0,2 μT^2 . Des valeurs plus élevées, de l'ordre de quelques microteslas, peuvent être toutefois rencontrées, notamment directement sous des lignes électriques à très haute tension, à proximité immédiate des locaux des transformateurs ou des sous-stations électriques. Dans l'environnement intérieur des habitations, des valeurs élevées de champ magnétique (jusqu'au millitesla) peuvent être mesurées, produites par des appareils domestiques dont certains sont utilisés très près du corps, comme par exemple les sèche-cheveux. Cependant, l'exposition à ces appareils est très brève et très localisée. Les expositions mesurées dans les moyens de transport, tels que les trains et tramways, sont habituellement de l'ordre de quelques microteslas (que ce soit à l'intérieur des voitures ou sur les quais de gare) alors qu'elles sont généralement inférieures à 2 μT dans les véhicules automobiles, indépendamment de la nature de la motorisation (thermique, électrique ou hybride).

Par ailleurs, l'étude réalisée par l'Inserm pour l'Anses sur l'exposition autour des lignes haute tension (HT) et très haute tension (THT) a permis d'estimer le pourcentage de la population

² Les valeurs limites d'exposition réglementaires dépendent de la fréquence. Elles sont définies pour des expositions aiguës. À 50 Hz, la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 du conseil de l'Union européenne concernant la population générale préconise une exposition maximale de 100 μT . Le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques fixe une valeur d'action basse à 1 000 μT (cf. 5.3.3 du rapport d'expertise).

exposée en environnement résidentiel sur le territoire métropolitain. Les résultats indiquent, selon les scénarios d'exposition retenus, que 0,28 % et 0,74 % de la population française est exposée à des champs magnétiques respectivement supérieurs à 0,4 μ T et 0,1 μ T. Environ 0,35 % des enfants de moins de 15 ans (\approx 40 000 enfants) sont exposés à leur domicile à un champ magnétique supérieur à 0,4 μ T, avec une importante variabilité selon les régions. Environ 0,18 % des enfants (\approx 8 000) scolarisés dans une école du premier degré fréquentent un établissement scolaire exposé à un champ magnétique supérieur à 0,4 μ T.

Les niveaux d'exposition des travailleurs sont très variables selon les postes occupés. Ils peuvent être, dans des situations particulières (par exemple lors de l'utilisation de certaines machines industrielles), supérieurs aux valeurs limites réglementaires (cf. 5.3.3 du rapport d'expertise). De plus, il a été montré, par des simulations numériques, que la densité de courant induit chez le fœtus dans le cas de l'exposition de la mère au travail, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition européennes recommandées pour la population générale³ (100 μ T à 50 Hz).

Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez l'Homme

La méthodologie précédemment décrite a été utilisée pour classer les différents effets potentiels de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez l'Homme. La synthèse des éléments de preuve et les niveaux de preuve associés à chaque effet étudié sont présentés dans le tableau 33 du rapport d'expertise.

D'après l'ensemble des données disponibles sur les effets sanitaires de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, les travaux d'expertise collective permettent de conclure à un effet possible de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie infantile, même si les études publiées après 2010 retrouvent moins fréquemment ce lien.

Deux études sur les quatre portant sur la sclérose latérale amyotrophique (SLA) font apparaître un lien entre cette pathologie et le fait d'exercer certaines professions en relation avec l'électricité. Elles présentent néanmoins des limites liées aux incertitudes associées à l'évaluation de l'exposition, qui rendent leur interprétation délicate. Ce lien pourrait être expliqué par différents facteurs d'exposition : champ magnétique, choc électrique, ou encore synergie entre agent physique et chimique, etc. Par ailleurs, deux méta-analyses ont rapporté un lien significatif, mais les biais de publications qu'elles comportent réduit leur fiabilité. À l'heure actuelle, les données considérées ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences sur la SLA, mais cette question devrait néanmoins faire l'objet de recherches complémentaires.

Concernant les tumeurs du système nerveux central chez l'adulte, deux études suggèrent la possibilité d'un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de gliomes ou de méningiomes. Une étude mentionne une tendance à l'augmentation du risque de méningiome à la limite de la significativité, et une autre étude ne retrouve pas de lien. À l'heure actuelle, les résultats des études disponibles sont trop hétérogènes pour conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences ; d'autres études sont donc nécessaires dans ce domaine.

Il en est de même en ce qui concerne les études sur la maladie d'Alzheimer (ou plus généralement les démences), deux études et une méta-analyse trouvent un excès de risque de démence associé à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Cependant, l'hétérogénéité des résultats et la probabilité de biais de publication ne permettent pas à ce jour de

³ Les conditions d'exposition d'une femme enceinte au travail sont régies par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. L'exposition du fœtus aux champs électromagnétiques doit être conforme aux prescriptions du décret n°2002-775 du 3 mai 2002, qui concerne la population générale, s'appuyant sur la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 de l'Union européenne.

conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Par ailleurs, l'ensemble des données considérées ne permet pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences sur :

- les tumeurs du système nerveux central chez l'enfant ;
- le cancer du sein ; ce lien avait été mis en évidence par l'étude d'Erren *et al.*, (2001) mais les études menées ultérieurement ne confirment pas cette association ;
- les hémopathies malignes chez l'adulte ;
- les autres cancers de l'adulte ;
- la maladie de Parkinson.

Certaines études expérimentales chez l'Homme et l'animal mettent en évidence une possible interférence entre l'exposition à des champs magnétiques à des niveaux faibles (de l'ordre du microtesla), et l'activité électrique cérébrale. On peut noter une certaine similitude entre ces résultats et ceux de l'expertise « radiofréquences et santé » publiée par l'Anses en 2013, qui notaient « une modification de l'activité électrique cérébrale (notamment de la puissance du rythme alpha) » après exposition aux radiofréquences. Des études complémentaires doivent être réalisées d'une part pour confirmer ces résultats, et d'autre part pour étudier les possibles conséquences physiopathologiques.

Recommandations issues des travaux d'expertise collective

Recommandations en matière d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Concernant la métrologie

La traçabilité et la fiabilité des mesures de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences restant un enjeu très important dans l'évaluation de l'exposition, le CES reprend la recommandation exprimée en 2010 par l'Afsset 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.

Le CES recommande également que les demandes de mesures d'exposition formulées par les services publics (préfectures, mairies, etc.) soient confiées à des acteurs pouvant répondre de capacités techniques prouvées concernant la réalisation de ces mesures, comme par exemple à travers une accréditation de type Cofrac.

Concernant l'exposition de la population générale

Considérant :

- le développement de nouvelles sources d'exposition liées à la production décentralisée de l'énergie, avec des sources de production de plus en plus proches des individus ;
- le développement important de nouvelles technologies consommatrices d'énergie (par exemple *data centers*) impliquant de nouvelles sources d'exposition potentiellement concentrées ;
- le manque de données sur certaines sources d'exposition identifiées (véhicules, transports publics, transformateurs, etc.) ;
- la multiplicité des sources d'exposition de la population générale, notamment en milieu urbain (lignes enterrées, signalisation, transports collectifs, etc.) ;

le CES recommande :

- de caractériser l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences spécifiquement liée aux postes de transformation électrique, notamment ceux situés près des lieux recevant du public, des habitations ou des lieux de travail ;
- d'évaluer l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques basses fréquences en milieu urbain, qui concentre une diversité de sources de champs électromagnétiques basses fréquences (lignes de transport aériennes et enterrées, transports collectifs, postes de transformation, etc.) ;
- d'évaluer, lorsque cela est techniquement possible, en amont de la mise en place d'une nouvelle technologie, l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences des futurs utilisateurs grâce à des techniques de modélisation ;
- de faciliter, pour les particuliers, les demandes de caractérisation de leur environnement électromagnétique par un laboratoire accrédité. Il s'agirait, par exemple, d'étendre aux basses fréquences « le dispositif national de mesure des champs électromagnétiques » de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

Concernant l'exposition en milieu de travail :

Considérant les niveaux de champs très différents auxquels les travailleurs peuvent être soumis selon leur métier, le CES souligne toute la pertinence du décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus à l'exposition aux champs électromagnétiques, imposant notamment à l'employeur de caractériser l'environnement électromagnétique des postes de travail. Le CES souligne également l'intérêt de l'action coordonnée de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), des Caisses d'assurance retraite et de santé au travail (Carsat) et de la Caisse régionale d'assurance maladie d'Île de France (Cramif) visant à recenser les équipements industriels les plus exposants et à mesurer les niveaux d'exposition associés à leur utilisation.

Considérant les niveaux de champ magnétique très élevés auxquels certains groupes de travailleurs sont exposés, et compte-tenu des incertitudes au sujet d'un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de certains effets sanitaires (tels que sclérose latérale amyotrophique et tumeurs du système nerveux central) chez les travailleurs exposés de façon chronique à des hauts niveaux de champ, le CES recommande :

- que les constructeurs de machines industrielles émettant des champs électromagnétiques basses fréquences (*a minima* celles faisant partie des 7 catégories de machines les plus exposantes mises en évidence par l'INRS) mesurent l'exposition associée à des conditions nominales de fonctionnement et d'utilisation de ces appareils et l'indiquent sur la fiche technique de la machine ;
- qu'un recueil de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques soit mis en place dans le suivi médical du personnel, tout le long de sa carrière, de façon inter-entreprise, de manière à permettre un suivi longitudinal de l'exposition professionnelle.

Concernant l'exposition des femmes enceintes

Considérant :

- l'article R. 4152-7-1⁴ du Code du travail ;
- que la densité de courant électrique induit chez le fœtus, dans certains scénarios d'exposition, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition recommandées

⁴ « Art. R. 4152-7-1. - Lorsque, dans son emploi, la femme enceinte est exposée à des champs électromagnétiques, son exposition est maintenue à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes, et en tout état de cause à un niveau inférieur aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques. »

(recommandation européenne 1999/519/CE) pour la population générale (100 μ T à 50 Hz) lorsque la mère est exposée à ces valeurs ;

le CES recommande ;

- de diffuser cette information auprès des employeurs et des médecins du travail ;
- qu'à leur tour, les employeurs et les médecins du travail informent les femmes de l'existence de dispositions réglementaires qui prévoient l'aménagement de leur poste de travail lorsqu'elles sont enceintes, pour limiter l'exposition du fœtus aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Concernant les valeurs limites d'exposition réglementaires

Considérant :

- que les expérimentations *in vivo* et *in vitro* ont mis en évidence la possibilité d'effets biologiques (stress oxydant, effets génotoxiques, effets sur la physiologie cellulaire) liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à des niveaux de l'ordre du millitesla ;
- que certaines catégories de travailleurs sont exposées à de tels niveaux de champ magnétique ;
- que le résultat de certaines études épidémiologiques met en évidence une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et certaines pathologies pour une exposition professionnelle (SLA, tumeurs du système nerveux central) ;
- les résultats des études dosimétriques sur l'exposition du fœtus ;

le CES recommande qu'une prochaine réévaluation des valeurs limites d'exposition prenne en compte tous les éléments scientifiques à disposition, notamment les plus récents, incluant les études épidémiologiques et les études *in vivo* et *in vitro* portant sur les effets biologiques.

Concernant l'urbanisme

Considérant l'augmentation potentielle de l'incidence de leucémies infantiles à proximité des lignes à haute tension, et malgré l'absence de preuve d'un lien de causalité direct entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de leucémie infantile, le CES souligne la pertinence de l'instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité⁵. Celle-ci recommande « d'éviter, dans la mesure du possible, de décider ou d'autoriser l'implantation de nouveaux établissements sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, maternelles, écoles primaires etc.) dans les zones qui, situées à proximité d'ouvrages THT, HT, lignes aériennes, câbles souterrains et postes de transformation ou jeux de barres, sont exposées à un champ magnétique de plus de 1 μ T ».

Recommandations en matière d'études et de recherches sur l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et sur les effets biologiques et sanitaires potentiellement liés à cette l'exposition

Concernant l'exposition

Considérant les résultats d'études de simulations numériques sur la femme enceinte et le fœtus, le CES recommande la poursuite des études de modélisation de l'exposition au cours de la grossesse.

⁵ http://circulaires.legifrance.gouv.fr/pdf/2013/04/cir_36823.pdf.

Considérant que les études toxicologiques sont menées sur des périodes d'exposition courtes, alors que la population ou les travailleurs sont généralement exposés à long terme aux champs électromagnétiques basses fréquences, le CES recommande de développer un indicateur d'exposition cumulée dans l'optique de réaliser des études toxicologiques vie entière.

Concernant les effets biologiques et sanitaires

D'un point de vue général, le CES recommande vivement la constitution de cohortes de travailleurs exposés ou non exposés, ou la pérennisation de cohortes existantes, pour étudier en épidémiologie le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de pathologies.

Considérant par ailleurs :

- que le nombre de sujets fortement exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences dans la population générale est faible, induisant une faible puissance statistique des études épidémiologiques s'intéressant aux lignes à haute tension ;
- que l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de pathologies, si elle existe, est faible ;

Le CES recommande,

- d'étudier des populations exposées ou potentiellement exposées aux niveaux les plus élevés de champs électromagnétiques basses fréquences telles que certaines catégories de professionnels ou les personnes habitant à proximité des postes de transformation (cf. étude multicentrique *Transexpo*⁶). Une attention toute particulière doit être portée aux personnes (enfants ou professionnels) qui habitent ou travaillent à proximité des postes de transformation et qui y sont exposées pendant la journée (que ce soit dans le cadre de leur fréquentation de crèches ou d'écoles ou de leur activité professionnelle).

Le CES souligne l'importance de disposer des adresses précises des résidences des sujets dans les registres de pathologies et leur géolocalisation, pour permettre d'étudier les effets sanitaires liés à des expositions environnementales. Il recommande de faciliter leur mise à disposition dans le cadre de recherches.

⁶ L'étude Transexpo est une étude épidémiologique internationale dont l'objectif est d'évaluer l'association entre l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'incidence de leucémie infantile. Elle consiste à étudier un échantillon d'enfants vivant dans des bâtiments comportant un transformateur moyenne tension / basse tension. L'intérêt de l'étude est sa capacité à sélectionner des sujets malades et non malades vivant dans le même immeuble et évaluer l'exposition à partir de la localisation du lieu de résidence sans requérir la participation des sujets. L'étude proposée permet ainsi d'éviter des biais de sélection des témoins ou de participation.

➤ **Leucémie infantile**

Considérant :

- que l'association entre l'exposition aux basses fréquences et l'apparition de leucémies infantiles a été mise en évidence dans des études épidémiologiques ayant estimé l'exposition aux champs électromagnétiques par la distance aux lignes ;
- que cette association n'a pas été retrouvée dans les études épidémiologiques qui estimaient l'exposition par modélisation ou à l'aide de mesures de champ magnétique, études de puissance statistique limitée ;
- l'absence de mécanisme d'action biologique identifié pouvant expliquer l'association épidémiologique ;

le CES recommande :

- de privilégier les analyses poolées, notamment pour les études basées sur des mesures directes de champs magnétiques ;
- d'encourager la recherche en épidémiologie sur les effets de l'exposition des champs électromagnétiques basses fréquences en tenant compte des co-expositions éventuelles (comme par exemple les polluants émis par le trafic routier) ;

Considérant les incertitudes scientifiques persistantes concernant la relation entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences et l'augmentation du risque de leucémies infantiles ;

le CES recommande :

- d'encourager l'utilisation de modèles animaux⁷ de leucémie lymphoblastique aiguë, notamment par la mise au point des modèles murins de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs électromagnétiques basses fréquences ;
- d'étudier l'implication possible d'un facteur tiers dont la toxicité est établie (agents génotoxiques, co-cancérogène, etc.) dans l'optique de comprendre expérimentalement la relation entre champs magnétiques basses fréquences et la survenue de leucémies de l'enfant.

➤ **Méningiomes**

Considérant les résultats hétérogènes sur le lien entre une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de méningiome, le CES recommande la poursuite des études épidémiologiques, en particulier chez les travailleurs.

➤ **Mélanome oculaire**

Considérant :

- l'unique étude d'envergure ayant rapporté un lien entre l'exposition professionnelle aux basses fréquences et la survenue de mélanome oculaire ;
- l'absence de prise en compte de certains facteurs de confusion et le mode de recueil des données imprécis de cette étude ;
- la faible incidence de cette pathologie dans la population (500 cas par an en France) ;

⁷ L'altération de la structure d'un ou plusieurs gènes peut entraîner une prédisposition à développer une maladie particulière. Ainsi, certains animaux sont génétiquement modifiés pour être prédisposés à développer une pathologie. Ils peuvent de ce fait être utilisés pour analyser l'influence de facteurs environnementaux dans l'induction de la pathologie.

le CES recommande de mener une étude internationale et/ou une étude poolée afin de confirmer ou infirmer ce résultat.

➤ **Sclérose latérale amyotrophique (SLA)**

Considérant :

- la mise en évidence, par quelques études épidémiologiques, d'une association entre SLA et exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez les travailleurs ;
- le manque de données sur l'exposition chronique des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences ;
- la mise en évidence de certains effets biologiques (stress oxydant) à des niveaux d'exposition de l'ordre du millitesla possiblement rencontrés chez certains travailleurs ;
- que ces effets biologiques retrouvés concernent principalement le stress oxydant, et qu'un modèle murin de SLA existant est un modèle impliquant une enzyme de la balance oxydative (mutation de la superoxyde dismutase) ;

le CES recommande

- en priorité de poursuivre la recherche sur la SLA, notamment avec des modèles murins spécifiques de cette pathologie ;
- l'enregistrement systématique et continu des cas de SLA afin d'encourager la recherche grâce à un registre de population documentant notamment l'histoire professionnelle (comme le registre irlandais des maladies du motoneurone, incluant la SLA, mais aussi la sclérose latérale primitive ou encore la maladie de Kennedy) ;
- de poursuivre la réalisation d'études épidémiologiques en milieu professionnel ;
- d'évaluer la part relative du risque pour les travailleurs liée à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et celle liée aux chocs électriques potentiellement subis.

➤ **Démences et maladie d'Alzheimer**

Considérant :

- les résultats non homogènes concernant l'apparition de maladie d'Alzheimer ;
- l'association observée dans deux études entre une exposition professionnelle aux basses fréquences et l'apparition de démences ;
- que cette association était plus significative chez les travailleurs ayant subi des chocs électriques ;
- que certains troubles cognitifs ont été mis en évidence chez des animaux exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences ;

le CES recommande :

- l'étude d'autres types de démences que la maladie d'Alzheimer (démence fronto-temporale, démence à corps de Levy, démence vasculaire, etc.) ;
- d'évaluer la part relative du risque pour les travailleurs liée à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et celle liée aux chocs électriques potentiellement subis.

➤ **Étude du fonctionnement cérébral**

Considérant certaines études qui mettent en évidence :

- des modifications des capacités de mémoire et des niveaux d'anxiété et d'émotion chez l'animal après l'exposition aux champs basses fréquences ;
- une modification de la plasticité cérébrale et de la neurogenèse après l'exposition aux champs basses fréquences ;
- la perturbation des potentiels évoqués (signaux EEG de très faible intensité) en réponse à l'exposition aux champs basses fréquences chez l'Homme ou l'animal ;

le CES recommande :

- de poursuivre la recherche dans ces domaines, afin de confirmer ou non ces résultats ;
- d'approfondir les connaissances sur les mécanismes biologiques potentiellement impliqués ;
- d'évaluer les conséquences pathologiques potentielles de ces effets sur les populations juvéniles et les adultes.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 17 mai 2018

Sigles et abréviations

4-HNE : 4-hydroxy-2-nonal

µT : microtesla

AA : acide arachidonique

ACGIH : *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*

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

ADN : acide désoxyribonucléique

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

AL : *Acute leukemia* - leucémie aiguë

ALL : *Acute lymphoid leukemia* - leucémie aiguë lymphoblastique (LAL)

AML : *Acute myeloid leukemia* - leucémie aiguë myéloblastique (LAM)

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AVC : accident vasculaire cérébral

BF : basses fréquences

BOLD : *Blood Oxygen Level Dependent*

Carsat : Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail

CAT : catalase

CES : comité d'experts spécialisés

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

CnamTS : Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés

CNS : *Central Nerve Stimulation*

Cofrac : Comité français d'accréditation

COL1A1 : collagène de type I

COX-2 : cyclooxygénase-2

Cram : Caisse régionale d'assurance maladie

Cramif : Caisse régionale d'assurance maladie d'Île de France

CRD : convention de recherche et de développement

CSTB : centre scientifique et technique du bâtiment

DC/AC : *direct current / alternative current*

DGS : Direction générale de la santé

DMBA : diméthylbenzanthrène

DMSO : diméthyl sulfoxyde

DNA : deoxyribonucléic acid

EAJE : établissements d'accueil des jeunes enfants

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

EC : *european commission*

ECG : électrocardiographie

EDF : Électricité de France

EEG : électroencéphalogramme

EGF : *epidermal growth factor* – facteur de croissance épidermique

Efhran : *European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure*

EHS : électrohypersensibilité

ELF : *extremely low frequencies* – extrêmement basses fréquences

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

eNOS : *endothelial nitric oxide synthase*

EPR : *European Pressurized Reactor* – réacteur pressurisé européen

ERP : *event related potentials* – potentiel évoqué (PE)

ESTR : *Expanded Simple Tandem Repeat*

Experts : projet « EXposition de la PERSONNE »

fEPSP : *field excitatory postsynaptic potential* - potentiels de champ post-synaptiques excitateurs

FFT : *Fast Fourier Transform* - transformée de Fourier rapide

FGF-2 : *fibroblast growth factor-2*

FRA : *facteur 35-kDa fos-related antigen*

FRAP : *Fluorescence recovery after photobleaching*

GHz : GigaHertz

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

GSH : glutathion (réduit)

GSH-PX : glutathion peroxydase

GSSG : glutathion (oxydé)

HDL : *high density lipoprotein* – lipoprotéine de haute densité

HR : *hazard ratio*

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

HT : haute tension

HTA (B) : haute tension A (B)

Hz : Hertz

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

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

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

IMC : indice de masse corporelle

iNOS : *inductible nitric oxide synthase*

INRS : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

Insee : Institut national de la statistique et des études économiques

Inserm : Institut national de la santé et de la recherche médicale

IRIS : Ilots Regroupés pour l'Information Statistique

IRM : Imagerie par résonance magnétique

ISCO : *International Standard Classification of Occupations*

JEM : *job exposure matrix* – matrice emploi exposition

LA : leucémie aiguë

LAL : leucémie aiguë lymphoblastique

LAM : leucémie aiguë myéloblastique

LCD : *liquid crystal display*

LDL : *low density lipoprotein* – lipoprotéine de basse densité

LLC : leucémie lymphoïde chronique

LMC : leucémie myéloïde chronique

LNH : lymphome non Hodgkinien

LTE4 : leucotriène E4

LTP : *long-term potentiation* - potentialisation à long terme

MA : maladie d'Alzheimer

MDA : malondialdéhyde

MG : Moyenne géométrique

MMP-2 : *matrixmetalloproteinase-2*

MMN : *mismatch negativity* – négativité de discordance

MMS : méthylmethanesulphonate

MNM : maladie du neurone moteur

MP : maladie de Parkinson

MPO : myeloperoxydase

mT : militestla

MTT : 3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5-diphenyl tetrazoliumbromide

MP : maladie de Parkinson

Na_v : *voltage-activated Na⁺ channels* – canaux sodiques voltage dépendant

NK : *natural killer* – cellules tueuses

Nocca : *Nordic Occupational Cancer Cohort*

NO : *nitric oxide* - oxyde nitrique

NOS : *nitric oxide synthase*

NOx : *nitrogen oxides*

NS : non significatif

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

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

OR : *odds ratio*

ORa : *odds ratio ajusté*

PACA : Provence - Alpes - Côte d'Azur

PCR : *polymerase chain reaction*

PE : potentiel évoqué - *event related potentials (ERP)*

PEA : potentiels évoqués auditifs

PELFMF : *pulsed extremely low frequency magnetic fields* - champs magnétiques pulsés basses fréquences

PES : potentiels évoqués somesthésiques

PEV : potentiels évoqués visuels

PGE2 : prostaglandine 2

PNS : *Peripheral Nerve Stimulation*

POMC : proopiomélanocortine

PPD : *paired pulse depression*

PPR : <i>paired pulse ratio</i>	UKCCS : <i>United Kingdom Childhood Cancer Study</i>
PTU : 6-n-propyl-2-thiouracil	UV : ultraviolet
RF : radiofréquences	VA : valeurs déclenchant l'action
ROS : <i>reactive oxygen species</i> – espèces réactives de l'oxygène	VA(B) : valeur déclenchant l'action pour l'induction magnétique B
RR : risque relatif	VA(E) : valeur déclenchant l'action pour le champ électrique E
RTE : Réseau de transport d'électricité	VGCCS : <i>voltage-gate calcium channel</i> - canaux calciques voltage-dépendants
RIVM : <i>Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu</i> - Institut National pour la santé publique et l'environnement	VLE : valeurs limites d'exposition
RMN : résonance magnétique nucléaire	WP : <i>Wavelet Packet</i>
RMS : <i>root mean square</i>	WHO : <i>World Health Organization</i> – OMS : Organisation mondiale de la santé
RR : risque relatif	
RT-PCR : <i>Reverse transcriptase polymerase chain reaction</i>	
Scenihr : <i>Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks</i> - Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux	
SCI : <i>section spinal cord</i> – section de la moelle épinière	
SES : statut économique et social	
SIG : système d'information géographique	
SLA : sclérose latérale amyotrophique	
SMR : <i>Standardized Mortality Ratio</i> - ratio standardisé de mortalité	
SNC : système nerveux central	
SOD : superoxyde dismutase	
SP : sclérose en plaques	
SSM : <i>Strålsäkerhetsmyndigheten</i> - Autorité suédoise de radioprotection	
STUK : <i>Säteilyturvakeskus</i> - Autorité finlandaise de radioprotection et de sûreté nucléaire	
TAC : capacité antioxydante totale	
TGF- β 2 : <i>transforming growth factor beta-2</i>	
TGV : train à grande vitesse	
THS : traitement hormonal substitutif	
THT : très haute tension	
TIMP2 : <i>tissue inhibitor of matrix metalloproteinase-2</i>	
TOS : statut oxydant total	
TST : travail sous tension	
TWA : <i>Time Weighted Average</i> – moyenne temporelle	
UE : Union européenne	

Liste des tableaux

Tableau 1 : liste des personnes auditionnées	6
Tableau 2 : liste des mots clés utilisés pour la recherche bibliographique	36
Tableau 3 : restrictions de base pour l'exposition humaine aux champs électrique et magnétique [Icnirp, 2010].....	56
Tableau 4 : niveaux de référence pour l'exposition du public aux champs électrique et magnétique [INRS, 2011].....	57
Tableau 5 : niveaux de référence pour l'exposition des travailleurs aux champs électrique et magnétique [INRS, 2011]	58
Tableau 6 : politiques concernant l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences dans différents pays.....	64
Tableau 7 : mode d'application du principe de précaution dans ces pays.....	65
Tableau 8 : valeurs déclenchant l'action pour une exposition des travailleurs à des champs électriques et magnétiques dont la fréquence est comprise entre 1 Hz et 10 MHz.....	67
Tableau 9 : Moyenne et médiane des mesures de champs magnétiques sous les lignes 400 kV, 225 kV, 90 kV et 63 kV.....	81
Tableau 10 : scénarios retenus pour l'exposition en fonction de la puissance de la ligne.....	81
Tableau 11 : estimation du nombre de personnes potentiellement exposées en France.....	84
Tableau 12 : nombre d'écoles du premier degré potentiellement exposées - méthode du bâti	85
Tableau 13 : valeurs de champs électriques et magnétiques mesurés dans une usine d'onduleurs (Teşneli et al. (2014)).....	92
Tableau 14 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition de leucémie infantile (dans l'ordre chronologique).....	108
Tableau 15 : Études explorant les facteurs de confusion entrant dans la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition de leucémie infantile (dans l'ordre chronologique).....	111
Tableau 16 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par des mesures de champs) et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).....	113
Tableau 17 : Analyses poolées investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).....	115
Tableau 18 : Études investiguant la relation entre l'exposition professionnelle des parents aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).....	116
Tableau 19 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition des autres cancers de l'enfant (par ordre chronologique).....	117
Tableau 20 : Études épidémiologiques ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le cancer chez l'adulte (dans l'ordre chronologique) – NS ; non significatif.....	125
Tableau 21 : Méta-analyse investiguant le lien entre les cancers de l'adulte et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences	128
Tableau 22 : Études épidémiologiques ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et les maladies neurodégénératives (dans l'ordre chronologique).....	133
Tableau 23 : Méta-analyses ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et les maladies neurodégénératives (dans l'ordre chronologique)	138
Tableau 24 : synthèse des études <i>in vitro</i> concernant le stress génotoxique.....	148

Tableau 25 : synthèse des études <i>in vivo</i> concernant le stress génotoxique	149
Tableau 26 : synthèse des études <i>in vitro</i> concernant le stress oxydant (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)	158
Tableau 27 : récapitulatif sur les études <i>in vivo</i> concernant le stress oxydant (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)	159
Tableau 28 : récapitulatif des études sur la physiologie cellulaire (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)	169
Tableau 29 : Études en relation avec les maladies neurodégénératives	177
Tableau 30 : Études en relation avec d'autres pathologies cérébrales	181
Tableau 31 : synthèse des études cliniques portant sur l'activité cérébrale	188
Tableau 32 : synthèse des études cliniques portant sur le <i>neurofeedback</i>	189
Tableau 33 : synthèse des études en relation avec les tâches cognitives et le comportement	199
Tableau 34 : synthèse des études en relation avec le comportement (anxiété, locomotion, interactions sociales, agressivité)	201
Tableau 35 : classement des éléments de preuves et du niveau de preuve pour chaque effet étudié	231
Tableau 36 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,1 μ T)	272
Tableau 37 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,2 μ T)	273
Tableau 38 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,3 μ T)	274
Tableau 39 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,4 μ T)	275

Liste des figures

Figure 1 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études chez l'Homme	41
Figure 2 : logigramme d'évaluation des éléments de preuves relatifs à un effet pathologique (A), ou biologique pouvant être relié à la pathologie (B), dans les études sur les modèles expérimentaux	44
Figure 3 : évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence d'un effet	45
Figure 4 : calcul du champ magnétique émis par une liaison aérienne (1 m au-dessus du sol, ligne 400 kV, calcul sur un demi-axe perpendiculaire à la ligne, en creux de portée entre deux pylônes)	71
Figure 5 : vue 3D d'un calcul de champ magnétique sous une ligne 400 kV	71
Figure 6 : représentation de la modélisation des scénarios (exemple dans le canton de Mantes-la-Jolie)	82
Figure 7 : rapprochement des résultats du géocodage avec le bâti	84
Figure 8 : estimation du parc français de machines rayonnantes (INRS, 2016)	89
Figure 9 : 10 ^e , 25 ^e , 50 ^e (valeur médiane), 75 ^e et 90 ^e percentiles de l'indice d'exposition (ratio par rapport à la valeur déclenchant l'action) dans chaque famille d'équipements (réf. INRS)	89
Figure 10 : Le système de 14 points de mesure de Koppel. (Koppel <i>et al.</i> , 2013)	91
Figure 11 : le système international 10-20 pour le positionnement des électrodes utilisées pour un électroencéphalogramme	182
Figure 12 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie de l'enfant (études 2010 – 2015)	214
Figure 13 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les cancers du système nerveux central de l'enfant (études 2010 – 2015)	215
Figure 14 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du sein (études 2010 – 2015)	217

Figure 15 : évaluation globale de l'effet de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du système nerveux central chez l'adulte (études 2010 - 2015).....	219
Figure 16 : évaluation globale de l'effet de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du système nerveux central chez l'adulte (études 2010 - 2015).....	220
Figure 17 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les hémopathies chez l'adulte (études 2010 - 2015).....	222
Figure 18 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer de la peau, des poumons et de la thyroïde et sur le mélanome de l'uvée (études 2010 - 2015).....	223
Figure 19 : évaluation du niveau de preuve de l'effet d'une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques sur la sclérose latérale amyotrophique (études 2010 - 2015).....	226
Figure 20 : évaluation du niveau de preuve de l'effet d'une exposition résidentielle aux champs électromagnétiques sur la sclérose latérale amyotrophique	227
Figure 21 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'émergence de la maladie d'Alzheimer	229
Figure 22 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'émergence de la maladie de Parkinson.....	230
Figure 23 : illustration de la hauteur des bâtiments de la BD Topo	269
Figure 24 : estimation de la population dans le bâti	271

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Sollicitée dans le cadre d'une saisine de ses ministères de tutelle, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset⁸) a publié un avis le 6 avril 2010 concernant les effets sur la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Cet avis était assorti d'un rapport d'expertise intitulé « synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences ». L'Agence avait alors émis plusieurs recommandations, et notamment la suivante, en matière d'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 ».

De son côté, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Opecst) avait recommandé, en 2010, la création de « zones de prudence » pour les jeunes enfants dans lesquelles l'exposition serait limitée à 0,4 μ T.

Le 15 avril 2013, la Ministre de l'écologie a signé une instruction demandant aux préfets de recommander aux collectivités territoriales et aux autorités en charge de la délivrance du permis de construire d'éviter, dans la mesure du possible, de décider ou d'autoriser l'implantation de nouveaux établissements sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, maternelles, écoles primaires etc.) dans les zones qui, situées à proximité d'ouvrages très haute tension (THT) ou haute tension (HT), lignes aériennes, câbles souterrains et postes de transformation ou jeux de barres, sont exposées à un champ magnétique de plus de 1 μ T.

Par ailleurs, la construction de la ligne THT Cotentin-Maine par Réseau de transport d'électricité (RTE) a entraîné une forte mobilisation d'associations locales de citoyens contre ce projet (une concertation dans le cadre de la déclaration d'utilité publique a été lancée début 2006, les travaux ont pris fin au printemps 2013).

Dans le domaine scientifique, la publication de Sermage-Faure *et al.* (2013) a mis en évidence une association statistiquement significative entre le fait d'habiter à moins de 50 m de l'aplomb d'une ligne à très haute tension et le risque de développer une leucémie infantile. Elle a présenté des résultats obtenus dans le cadre de l'enquête nationale Géocap, étude épidémiologique cas/témoins dont l'objectif premier était d'investiguer les sources potentielles de cancers solides et hémopathies malignes de l'enfant.

Dans ce contexte où convergent des préoccupations d'origine réglementaire, scientifique et sociétale, les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture ont sollicité l'Anses afin de mettre à jour les connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

⁸ L'Afsset et l'Afssa ont fusionné le 1^{er} juillet 2010 et ont donné naissance à l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail).

1.2 Objet de la saisine

La demande d'expertise formulée dans un courrier de saisine (cf. Annexe 1) par les ministères en charge de la santé, du travail, de l'environnement et de l'agriculture portait sur les points suivants :

- le recensement et l'analyse des nouvelles données de la littérature scientifique et réglementaire apparues depuis la publication du rapport de l'Afsset le 29 mars 2010 concernant l'évaluation de l'exposition et l'effet des champs magnétiques basses fréquences sur des modèles animaux et sur l'Homme (études toxicologiques, épidémiologiques, etc.) ;
- l'analyse critique de l'étude de Sermage-Faure *et al.*, 2013.

L'Anses a donc été sollicitée afin d'évaluer si l'ensemble de ces éléments devait conduire à mettre à jour son avis sur les risques sanitaires liés à l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences, aussi bien pour la population générale que pour les travailleurs.

1.3 Limites du champ d'expertise

Les basses fréquences font partie des champs électromagnétiques non ionisants (dont les fréquences se situent entre 0 et 300 GHz), au même titre que les champs statiques, les radiofréquences, les rayonnements infrarouges ou la lumière visible.

Dans cette expertise, le groupe de travail a adopté la terminologie suivante :

- les basses fréquences sont définies par le domaine fréquentiel suivant : $0 < f \leq$ quelques kHz
- les radiofréquences sont définies par le domaine fréquentiel se situant entre une dizaine de kilohertz et quelques centaines de gigahertz. La limite basse des radiofréquences de 8,3 kHz est issue de la classification de l'union internationale des télécommunications, article 5, section 4 (ITU, 2012).

À noter que cette définition n'est pas consensuelle et les termes « extrêmement basses fréquences » peuvent désigner la gamme de fréquences définies ci-dessus comme « basses fréquences ».

Les publications dans les domaines suivants, non directement reliés à la question posée, n'ont pas été prises en compte ;

- les champs statiques (l'expertise est focalisée sur les champs magnétiques basses fréquences variables dans le temps) ;
- les applications thérapeutiques des champs électromagnétiques basses fréquences en tant qu'aide à la régénération des tissus (niveaux d'exposition en règle générale très élevés, non atteints dans l'environnement) ;
- la compatibilité électromagnétique (l'expertise est consacrée aux effets des champs magnétiques basses fréquences sur la santé humaine) ;
- les méthodes de blindage (l'efficacité de moyens de protection contre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences n'a pas été évaluée dans cette expertise) ;
- les modèles non mammaliens (seuls les modèles utilisant des mammifères pouvant être extrapolés à l'Homme ont été considérés) ;
- les sciences sociales (les conséquences sociales et sociétales de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences n'ont pas été évaluées).

1.4 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

À la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 26 février 2015, un groupe de travail intitulé « champs électromagnétiques basses fréquences » a été constitué. Les experts de ce groupe ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de

la métrologie et de l'exposimétrie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la physiologie et de la réglementation dans le domaine des champs électromagnétiques. L'Anses a confié à ces sept experts indépendants la réalisation de l'expertise.

Le groupe de travail s'est réuni 22 fois en séances plénières (32 jours) entre septembre 2015 et février 2018. Lors de ces réunions, une dizaine d'auditions de parties prenantes (scientifiques, représentants d'associations, industriels *etc.*) a également été réalisée (*cf.* liste des personnes auditionnées dans la présentation des intervenants). En complément de ces auditions, des contributions écrites ont été sollicitées auprès de rapporteurs (*cf.* liste des rapporteurs dans la présentation des intervenants en tête du rapport).

Cette expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux grands aménagements et aux nouvelles technologies ». Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

Les travaux du groupe de travail ont été adoptés par le CES le 17 mai 2018.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) »

1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet <http://www.anses.fr>.

2 Méthodologie d'expertise

Pour réaliser cette expertise collective, le groupe de travail a considéré différentes sources d'information. Il a analysé la réglementation internationale sur les valeurs limites d'exposition réglementaires aux champs électromagnétiques basses fréquences. Il a en suite procédé au recueil et à l'analyse de nombreux articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture. En complément, les rapports d'expertises les plus récents réalisés sur le sujet par des instances nationales et internationales ont été examinés. Le groupe de travail a également auditionné plusieurs professionnels et/ou experts du domaine. Enfin, deux études originales, suivies au sein du groupe de travail, financées et coordonnées par l'Anses, viennent compléter cette analyse : 1) l'analyse des données brutes des mesures de champs électromagnétiques réalisées pour RTE à proximité des lignes de transport d'électricité, conformément à la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 (cf. 5.2.3) ; 2) une estimation du nombre d'habitants et d'écoles primaires à proximité des lignes haute et très haute tension (cf. 5.2.5).

La méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences est présentée en fin de chapitre.

2.1 Analyse des réglementations par pays

Les données sur les réglementations dans les pays étrangers ont été extraites de deux enquêtes menées auprès des membres du comité consultatif du projet international pour l'étude des champs électromagnétiques de l'OMS. La première enquête concernait l'élaboration d'une réglementation de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences pour la population générale, entre le milieu des années quatre-vingt jusque 2006. Elle a été distribuée aux représentants des 47 états membres en mai 2006. La seconde enquête a été menée en mai 2013. Elle était plus complète que la première, puisqu'elle prenait en compte l'ensemble du spectre électromagnétique non ionisant, et la réglementation concernant la population générale et professionnelle.

Quarante-trois pays ont répondu à la première enquête au début de l'année 2007, et 38 ont répondu à la seconde jusqu'en juin 2016.

Les réponses ont été analysées pour corriger les données manquantes et les incohérences. Des compléments d'information ont été apportés par correspondance particulière ainsi que par la prise en compte de documents officiels lorsqu'ils ont été fournis (par exemple des textes de lois, d'ordonnance, ...).

Des mises à jour régulières ont été apportées jusqu'à fin 2016, liées notamment au fait que la directive européenne 2013/35/UE concernant l'exposition professionnelle a été transposée en droit national par les états membres en 2016.

2.2 Analyse de la bibliographie scientifique

2.2.1 Recensement des articles scientifiques

L'équipe de coordination du groupe de travail « Champs électromagnétiques basses fréquences », la cellule de veille bibliographique de l'Anses, ainsi que les experts du groupe de travail ont réalisé une recherche bibliographique la plus exhaustive possible de la littérature scientifique internationale sur les thèmes de la mesure de l'exposition et des effets sanitaires potentiels des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'Homme, à travers notamment la recherche d'effets *in vitro*, *in vivo*, de données cliniques et épidémiologiques.

2.2.1.1 Période de référence

La mise à jour de l'expertise a été réalisée pour la période qui s'étend du 1^{er} janvier 2010 (date de publication du précédent rapport de l'agence publié en mars 2010) au 31 décembre 2015 (date de fin de la revue bibliographique). De plus, les experts ont pu, si besoin, inclure dans la bibliographie toute étude parue avant 2010 si cela leur semblait nécessaire, notamment pour présenter un état

de l'art des connaissances relatives aux différents effets sanitaires étudiés. Certaines études disponibles en ligne en 2015, et publiées en 2016, ont pu être ainsi prises en compte.

2.2.1.2 Moteurs de recherche

Des moteurs de recherche et bases de données regroupant spécifiquement des études dans le domaine des effets des champs électromagnétiques ont été consultés :

- PubMed : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>
- Scopus : <http://www.scopus.com/home.url>
- EMF-Portal : <http://www.emf-portal.de/index.php?l=e>
- IEEE : www.ieee.org

2.2.1.3 Typologie des documents expertisés

Les documents pris en compte dans l'expertise sont de natures diverses :

- des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, sans préjuger de leur facteur d'impact ;
- des rapports d'expertise d'organismes nationaux ou internationaux ;
- les verbatim des auditions ;
- les rapports de recherches financées par l'Anses (convention de recherche et de développement).

Seuls les articles originaux rédigés en anglais ou en français ont été systématiquement analysés par le groupe de travail. Les actes ou comptes rendus de conférences et articles publiés dans d'autres langues n'ont pas été pris en compte.

Les revues, qui consistent à synthétiser l'ensemble des études publiées sur un sujet donné, ont pu être intégrées au rapport, en fonction de leur intérêt, lorsqu'elles apportaient des éléments informatifs sur les travaux antérieurs à 2010.

2.2.1.4 Priorisation

Compte tenu du nombre très important de publications ciblées par la recherche bibliographique, le groupe de travail a décidé de procéder à une priorisation des travaux à effectuer dans le cadre de cette expertise.

2.2.1.4.1 En fonction des effets sanitaires

Après avoir listé de manière exhaustive l'ensemble des effets sanitaires explorés par la littérature scientifique, le groupe de travail a procédé à la priorisation de certains d'entre eux. La revue des rapports internationaux sur le sujet (chapitre 3) ayant montré que les effets sanitaires jugés préoccupants étaient la leucémie de l'enfant, les cancers et les maladies neurodégénératives, les experts ont décidé d'étudier de façon exhaustive et systématique ces pathologies pour les études épidémiologiques.

Depuis de nombreuses années, dans le domaine des basses fréquences, les recherches menées pour déceler un mécanisme explicatif des résultats épidémiologiques mis en évidence dans les années 2000 sont restées sans succès. Depuis, les chercheurs ont investigué des effets biologiques de plus en plus larges, si bien qu'il n'est plus possible de rapprocher certaines études expérimentales à des effets sanitaires précis. Par conséquent, les experts ont choisi de considérer l'ensemble des effets biologiques étudiés dans ce domaine, afin de n'écartier aucun mécanisme explicatif de l'effet potentiel des champs électromagnétiques basses fréquences sur le vivant.

La question de l'électrohypersensibilité est abordée dans un travail d'expertise de l'Anses spécifique, publié en mars 2018 (Anses, 2018).

2.2.1.4.2 *En fonction des conditions d'exposition*

Dans cette expertise, la gamme des basses fréquences considérées est définie par le domaine fréquentiel suivant : $0 < f \leq$ quelques kHz. Seules les études utilisant des champs électromagnétiques de cette gamme de fréquences ont été retenues.

Les situations d'exposition prises en compte dans cette expertise concernent celles liées à la proximité d'appareils électriques ou des réseaux de distribution de l'électricité, pour la population générale comme pour les professionnels. Étant donné que la valeur limite réglementaire, pour les travailleurs exposés à des champs magnétiques à la fréquence 50 Hz, est de 1 000 μ T (valeur basse déclenchant l'action, cf. 4.3.2), seuls les articles de recherche où les modèles expérimentaux étaient exposés à des valeurs inférieures ou égales à cette limite ont été considérés dans l'expertise.

Les applications thérapeutiques des champs électromagnétiques basses fréquences en tant qu'aide à la régénération des tissus étant hors cadre de cette saisine, les articles présentant des systèmes d'exposition caractéristiques de ces applications (telles que des ondes impulsionnelles) ont été exclus de l'analyse.

2.2.1.5 *Mots clés utilisés*

Les mots clés utilisés sont regroupés dans le Tableau 2. Les publications collectées sont issues d'une équation de recherche croisant les mots clés par effet sanitaire avec les mots clés associés au type d'exposition ou de technologie générant des champs électromagnétiques basses fréquences.

Tableau 2 : liste des mots clés utilisés pour la recherche bibliographique

Effet sanitaire	Mots clés		
Cancer	cancer	carcinogenesis	genomic instability
	carcinoma	cell death	epigenetic
	adenoma	apoptosis	genotoxic
	tumour	necrosis	DNA damage
	brain tumour	lymphoma	mutation
	glioma	cellular proliferation	DNA repair
	meningioma	lymphoblastic leukemia	DNA break
	childhood leukaemia	phosphene	oxidative stress
	childhood leukemia	ALL	ROS
	leukemia	AML	
	bone marrow	AL	
Neurologie	alzheimer	parkinson	memory
	cognitive disorders	cognitive function	
	dementia	neurodegenerative	
Exposition / technologie	power line	transformers	workers
	power plant	extremely low frequency	occupational
	power transmission line	induced current	electric field
	extremely low frequency magnetic fields	mT	Hz
	electromagnetic field	μ T	contact current
	ELF		corona ions

2.2.2 Analyse des publications

2.2.2.1 Une analyse collective

Les experts du groupe de travail ont mis leurs compétences complémentaires en commun pour analyser collectivement les études sur les effets d'une exposition aux champs électromagnétiques sur la santé.

Chaque article a été sélectionné sur la base de son titre et de son résumé afin de juger de sa pertinence par rapport à la question traitée. Les articles retenus ont ensuite été analysés en détail par au moins deux experts.

2.2.2.2 Critères de qualité retenus pour l'analyse des études

Au cours des premières séances de travail, le groupe de travail a établi une liste de critères objectifs visant à évaluer la qualité des études analysées indépendamment des résultats avancés dans la publication. Chaque expert relecteur a donc renseigné une grille de lecture, avec l'appui des coordonnateurs scientifiques de l'Anses. Les études qui ne satisfaisaient pas ces critères ou qui ne comportaient pas assez de détails pour en faire l'évaluation ont été rejetées et la raison du rejet explicitée.

Les critères de qualité sont les mêmes que ceux utilisés pour les expertises sur les effets des radiofréquences (Anses 2009, Anses 2013, Anses 2016).

2.2.2.2.1 Critères de qualité des études épidémiologiques

Les types d'études épidémiologiques analysées dans le cadre de cette expertise sont les suivantes :

- des études transversales, qui examinent, à un instant donné, pour chaque individu de l'étude, son exposition et la présence de maladie ;
- des études cas-témoins, qui consistent à comparer la fréquence de l'exposition antérieure d'un échantillon de cas (malades) à celle d'un échantillon dit témoin, de personnes non atteintes de cette maladie, représentatif du reste de la population ;
- des études de cohorte, qui consistent à comparer la survenue de maladies entre des individus non exposés et des individus exposés au facteur, ou entre des groupes exposés à différents niveaux, en suivant dans le temps l'apparition des maladies ;
- des méta-analyses et les analyses poolées, qui consistent à regrouper respectivement soit les résultats, soit les données brutes d'études antérieures (et semblables), afin d'obtenir une puissance plus importante. Elles sont particulièrement adaptées à l'épidémiologie étiologique.

Si toutes ces études peuvent avoir pour vocation de montrer une association entre exposition et survenue de la maladie, elles n'apportent pas forcément le même niveau de preuve quant à la causalité de la relation, en raison de leur structure mais également de la présence possible d'artéfacts liés au hasard ou de biais. Le plus haut niveau de preuve est obtenu grâce à l'utilisation d'essai contrôlé randomisé (exposition d'un bras « intervention » à un effet *versus* absence d'exposition sur un bras « contrôle »). En épidémiologie, il n'est en général pas possible de randomiser l'exposition globale dans une population, c'est-à-dire d'en avoir une répartition aléatoire, surtout s'il s'agit de l'étude d'un facteur environnemental. Dans cette situation, les méta-analyses d'études cas-témoins représentent le niveau de preuve le plus élevé, à condition qu'elles soient rigoureusement conduites et exemptes de biais de publication notamment.

Les critères suivants ont été déterminants dans l'évaluation de la qualité méthodologique des études épidémiologiques :

- Définition de la population ; l'échantillon est-il représentatif de la population ?
- La caractérisation de l'exposition : dans les études épidémiologiques en population générale, l'estimation de l'exposition peut se faire soit par une mesure de la distance aux

lignes à haute tension, soit par le biais de mesures de champs électromagnétiques basses fréquences, soit par calcul. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients :

- Considérant uniquement les champs émis par les lignes, la mesure de la distance aux lignes est simple à mettre en œuvre, mais reflète très indirectement l'exposition au champ magnétique, qui varie selon les moments de la journée, des saisons, etc.
 - La mesure des champs à l'aide d'appareils de mesure donne des résultats fiables, mais le coût de cette démarche est incompatible avec un échantillon de grande taille.
 - Enfin, dans le cadre d'un calcul théorique, les valeurs sont dérivées d'une modélisation mathématique dont les paramètres varient selon les études.
- la façon dont les facteurs de confusion ont été pris en compte ;
 - la pertinence des méthodes statistiques employées.

L'interprétation des résultats des études épidémiologiques est complexe. Elle s'appuie sur des tests statistiques qui visent à déterminer si l'association entre une exposition et une pathologie est significative. Dès lors que l'on utilise des tests statistiques, deux types d'erreurs sont possibles :

- Le risque de première espèce (ou risque *alpha*) : c'est le risque de conclure à l'existence d'un effet alors qu'il n'existe pas. Par convention, les études utilisent un risque *alpha* à 5 %. La détermination de ce niveau de risque *alpha* accepté par les auteurs influe sur l'ampleur de l'intervalle de confiance.
- Le risque de deuxième espèce (ou risque *beta*) : c'est le risque de conclure à une absence d'effet alors qu'un effet existe en réalité.

La puissance de l'étude est donnée par la formule $P = 1 - \beta$. Si on considère un échantillon de taille constante, l'augmentation du risque *alpha* entraîne la diminution du risque *beta* et inversement.

Cependant, il est important de prendre en compte également d'autres facteurs : la force de cette association (mesure du risque), la taille de l'intervalle de confiance associé à la mesure du risque, la puissance, la méthodologie et le type de l'étude. Ainsi, il est possible que les statistiques ne mettent pas en évidence une association significative, mais que cette association soit proche du seuil de significativité. Au regard des autres facteurs précédemment cités, les auteurs des études ou les experts du groupe de travail peuvent être amenés à conclure à une « augmentation » ou « diminution non significative du risque » lorsque les tests statistiques sont très proches du seuil de significativité.

2.2.2.2.2 Critères de qualité dans les études sur les modèles cellulaires ou animaux

La recherche expérimentale sur les effets des champs électromagnétiques basses fréquences nécessite une double compétence de la part des équipes de chercheurs. Les modèles animaux ou cellulaires doivent être exposés de façon contrôlée, ce qui requiert des compétences en physique et en électromagnétisme. La suite des expériences nécessite des compétences en biologie. De ce fait, les critères de qualité de ces études doivent prendre en compte la maîtrise du système d'exposition et la maîtrise des techniques expérimentales utilisées en biologie. Par conséquent, l'évaluation de la qualité de ces études a nécessité une double lecture par un expert physicien et un expert biologiste.

La qualité d'une étude expérimentale *in vitro* ou *in vivo* a été déterminée selon les paramètres suivants :

- la pertinence du système d'exposition : dans la plupart des études, les systèmes d'exposition ont été « fait maison », de façon à les adapter aux modèles cellulaires ou aux animaux utilisés. Or, il est important que le champ soit homogène au niveau des cages des animaux ou des cellules exposées. Une attention toute particulière a été accordée à la précision avec laquelle le système d'exposition a été décrit dans l'article ;

- la pertinence des modèles biologiques ; dans le cadre de ce rapport, seuls les modèles mammaliens ont été pris en compte ;
- la façon dont sont constitués les groupes d'animaux dans les études *in vivo*, notamment vis-à-vis de l'âge et du sexe ;
- la présence de groupe d'exposition factice (*sham*), voire de contrôles cage (animaux non exposés, non placés dans le système d'exposition, mais soumis aux mêmes conditions de vie ;
- la puissance de l'étude (nombre d'animaux par groupe, répétition des manipulations, etc.) ;
- la description de la manipulation, et notamment la réalisation des tests en aveugle ;
- la présentation des résultats obtenus (pas d'incohérence, présence de barres d'erreur sur les graphiques, etc.).

2.2.2.2.3 Critères de qualité dans les études d'exposition

Les études d'exposition retenues ont démontré une démarche rigoureuse en matière d'évaluation et de mesure de l'exposition par des protocoles et des méthodologies clairement explicitées. En effet, il est important, pour évaluer la pertinence des mesures, de disposer du maximum d'information sur le dispositif expérimental utilisé, de la méthodologie suivie et du traitement des données de mesures. Le type d'appareil utilisé doit être clairement identifié et la vérification de son bon fonctionnement nécessaire, en plus de son étalonnage périodique.

2.2.2.2.4 Critères de qualité dans les études dosimétriques

L'évaluation dosimétrique de l'exposition aux champs électromagnétiques dans différents scénarios d'exposition dépend de la configuration de l'exposition (par exemple : types de sources, fréquence et polarisation du champ électromagnétique incident) et des caractéristiques physiques des sujets exposés (morphologie, propriétés diélectriques et posture). Par conséquent, la simulation par ordinateur de la dosimétrie doit tenir compte des conditions susmentionnées. La variabilité du champ électrique interne ou de la densité de courant induit dans le corps exposé aux champs électromagnétiques est également étroitement liée aux propriétés diélectriques du tissu (conductivité électrique du milieu en *Siemens/m* et permittivité relative, sans unité). Les simulations sur ordinateur doivent avoir une résolution appropriée des objets étudiés, et l'incertitude doit également être soigneusement évaluée.

2.3 Auditions

2.3.1 Objectif des auditions

Les auditions de scientifiques et de parties prenantes ont permis d'obtenir des données et des informations complémentaires de celles issues de la littérature scientifique.

2.3.2 Préparation et déroulement des auditions

La personne auditionnée a reçu au moins une semaine précédant l'audition un questionnaire écrit rédigé par l'Anses et les experts du groupe de travail.

Les auditions ont débuté par une présentation de la (des) personne(s) auditionnée(s), suivie d'une séance de questions-réponses et d'échanges avec les experts du groupe de travail. Elles ont duré environ deux heures.

Dans un souci de transparence et de traçabilité, toutes les auditions ont fait l'objet d'une prise de notes et d'un enregistrement par un prestataire mandaté par l'Anses (à l'exception de la première, celle de Jacqueline Clavel, qui a fait l'objet d'un simple compte-rendu).

Les verbatim ainsi réalisés ont ensuite été envoyés aux personnes auditionnées pour relecture de leur contenu et d'éventuelles corrections de forme.

2.3.3 Traitement et utilisation des informations obtenues

Les experts du groupe de travail ont réalisé un travail d'analyse du contenu de ces auditions. Ils en ont tiré les éléments d'information qui, selon eux, étaient importants, et les ont utilisés pour alimenter certaines parties du rapport. Cette restitution, qui appartient aux experts du groupe de travail, n'engage aucune des personnes auditionnées, bien qu'elle s'appuie évidemment sur les entretiens conduits.

2.3.4 Personnes auditionnées

La liste des personnes auditionnées figure dans le Tableau 1 (voir la présentation des intervenants).

2.4 Évaluation de la proportion de la population française habitant à proximité de lignes de transport d'électricité et de la proportion d'enfants fréquentant des écoles également à proximité de ces lignes.

Afin de combler un manque d'information dans le domaine de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences de la population française et des enfants en particulier, une « convention de recherche et développement » (CRD) a été signée avec le laboratoire U1086 ANTICIPE de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) le 29 avril 2016. L'objectif de ce projet de recherche était, d'une part, d'estimer le nombre d'habitants potentiellement impactés par la présence d'une ligne à haute ou très haute tension en France, et, d'autre part, de dénombrer les établissements d'accueil de jeunes enfants et les écoles du premier degré à proximité de ces lignes.

2.5 Évaluation du niveau de preuve pour chaque effet étudié

2.5.1 Évaluation des éléments de preuves pour les études chez l'Homme

Pour un effet sanitaire donné, l'ensemble des études disponibles chez l'Homme (cliniques et épidémiologiques) publiées entre 2010 et 2015 est considéré à travers le logigramme suivant, afin de caractériser les éléments de preuve apportés au lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'effet considéré.

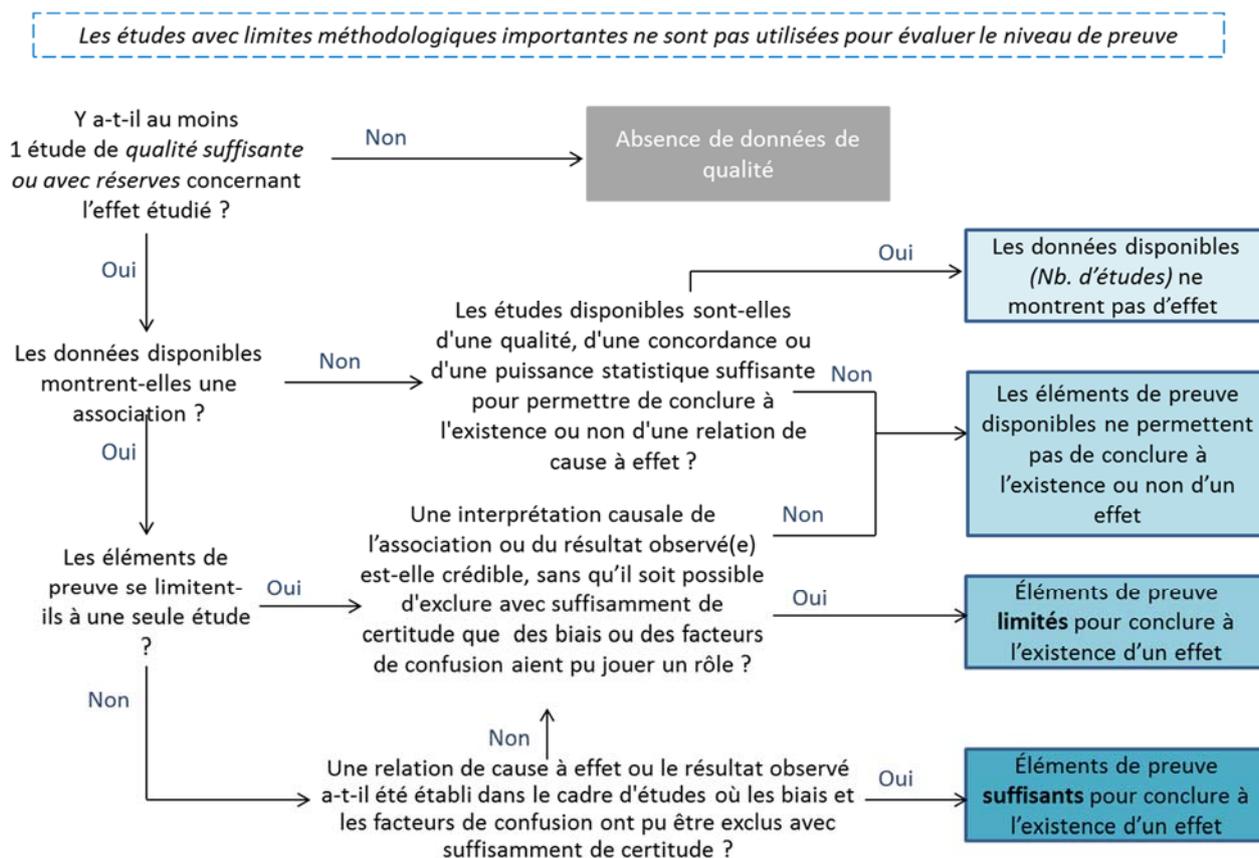


Figure 1 : logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études chez l'Homme

Les données relatives à l'effet étudié provenant d'études sur l'Homme (épidémiologiques et cliniques) sont classées en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet, dans l'une des catégories suivantes :

- **Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à effet a été établie entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés et l'effet étudié. En d'autres termes, une relation significative a été établie entre l'exposition et la survenue de l'effet, dans le cadre de plusieurs études où les biais et les facteurs de confusion ont pu être exclus avec suffisamment de certitude (cf. critères dits de « Bradford-Hill »).
- **Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet** : une association significative a été établie entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés et la survenue de l'effet étudié, et le collectif d'experts estime qu'une interprétation causale de cette association est crédible, mais il n'a pas été possible d'exclure avec suffisamment de certitude que les biais ou les facteurs de confusion aient pu jouer un rôle.
- **Éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** : les études disponibles, a) ne montrent pas d'association et ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une puissance statistique suffisantes pour permettre de conclure à l'absence d'effet ; b) montrent une association mais ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une puissance statistique suffisantes pour permettre de conclure à l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés et l'effet direct étudié.
- **Les données disponibles ne montrent pas d'effet** : les résultats de l'ensemble des études disponibles, couvrant la totalité des niveaux d'exposition connus pour être rencontrés chez l'Homme, sont, convergents : ils ne font pas ressortir d'association positive entre l'exposition

aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés et l'effet étudié et ce, quel que soit le niveau d'exposition examiné. Les résultats de ces études, seuls ou combinés, devraient disposer d'intervalles de confiance étroits, dont la limite supérieure devrait être proche d'une valeur nulle (par exemple un risque relatif de 1,0). Biais et facteurs de confusion doivent être exclus avec une certitude raisonnable, et les études devraient avoir un suivi suffisamment long. Lorsque les renseignements disponibles suggèrent « une absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet étudié, aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés, aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études dont on dispose. Au demeurant, l'éventualité de l'existence d'un risque très faible aux niveaux d'exposition étudiés ne peut jamais être exclue.

2.5.2 Évaluation des éléments de preuves pour les études expérimentales

Afin de caractériser les éléments de preuve apportés au lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et un effet sanitaire considéré, l'ensemble des études disponibles publiées entre 2010 et 2015 sur des modèles animaux et cellulaires est considéré à travers le logigramme présenté ci-dessous (cf. Figure 2).

Les éléments de preuve fournis par les études recherchant l'induction d'une pathologie suite à l'exposition d'un modèle animal fournissent le niveau de preuve le plus élevé concernant le lien potentiel entre l'exposition d'intérêt et la pathologie concernée (cf. Figure 2A). Cependant, des éléments de preuve concernant des effets biologiques peuvent venir compléter l'évaluation des éléments de preuve (cf. Figure 2B), en particulier lorsque les études sur les modèles animaux d'une pathologie sont parcellaires, voire inexistantes. Ces éléments de preuve biologiques doivent être reliés à la pathologie concernée par les connaissances scientifiques actuelles. Cependant, le poids attribué à ces éléments de preuve est moindre, car l'association entre l'exposition et l'effet sanitaire devient indirecte. Ces éléments de preuve interviennent alors comme modulateur du classement obtenu en considérant uniquement les effets sanitaires.

Ainsi, comme indiqué dans le logigramme, le groupe de travail a tout d'abord procédé à l'analyse des études ayant utilisé un modèle expérimental directement en relation avec la pathologie considérée. En l'absence de publication ayant spécifiquement étudié cette pathologie, le groupe de travail a étendu son analyse aux études portant sur des effets biologiques ayant une relation indirecte, mais avérée, avec la pathologie. Par exemple, l'analyse de l'impact des basses fréquences sur le stress génotoxique, ou le stress oxydant, a été intégrée dans l'analyse de l'effet cancérigène de ces ondes. En effet, l'oxydation de l'ADN et la présence de mutations sont retrouvées dans de nombreuses tumeurs. Les publications étudiant l'effet de l'exposition sur la prolifération cellulaire, l'apoptose, ou la différenciation cellulaire ont également été intégrées dans l'évaluation globale du risque d'avoir un cancer. Pour les maladies neurodégénératives, le groupe de travail a analysé les publications relatives à l'homéostasie protéique et au stress oxydant car ces phénomènes biologiques sont impliqués dans la genèse ou la progression de ces pathologies.

Les données relatives à l'effet étudié provenant de ces deux types d'études expérimentales (directes ou indirectes) sont classées en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet, dans l'une des catégories suivantes :

- **Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à effet a été établie entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés et l'effet étudié a) chez deux espèces animales ou plus ; ou b) dans le cadre de deux études distinctes ou plus, portant sur une même espèce, effectuées à des moments différents, ou dans des laboratoires différents, ou selon des protocoles différents.
- **Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet** : les données disponibles laissent penser qu'il existe un effet, mais elles sont limitées et ne permettent pas de faire une évaluation définitive parce que : a) les éléments de preuve de l'effet se limitent à une seule expérience mais dont le protocole a été jugé de bonne qualité, sans limites méthodologiques majeures ; ou b) plusieurs études de bonne qualité montrent des

résultats convergents, mais des questions restent en suspens en ce qui concerne la pertinence du protocole, la conduite ou l'interprétation des données ; ou l'incidence de l'effet observé peut être naturellement élevée chez certaines souches.

- **Éléments de preuve disponibles ne permettant pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** : les études ne peuvent pas être interprétées comme prouvant la présence ou l'absence de l'effet étudié, parce que : a) il n'y a qu'une seule étude qui ne montre pas d'effet b) il y a plusieurs études qui ne montrent pas d'effet mais elles n'ont pas été effectuées chez 2 espèces animales au moins, ou bien c) elles présentent d'importantes faiblesses d'ordre qualitatif ou quantitatif.
- **Les données disponibles ne montrent pas d'effet** : un nombre suffisant d'études est disponible, portant sur deux espèces au moins, qui montrent, de manière convergente et dans les limites des expériences réalisées, que les champs électromagnétiques basses fréquences considérés n'ont pas d'effet. Lorsque les renseignements obtenus suggèrent une « absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet étudié, aux champs électromagnétiques basses fréquences considérés, aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études.

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

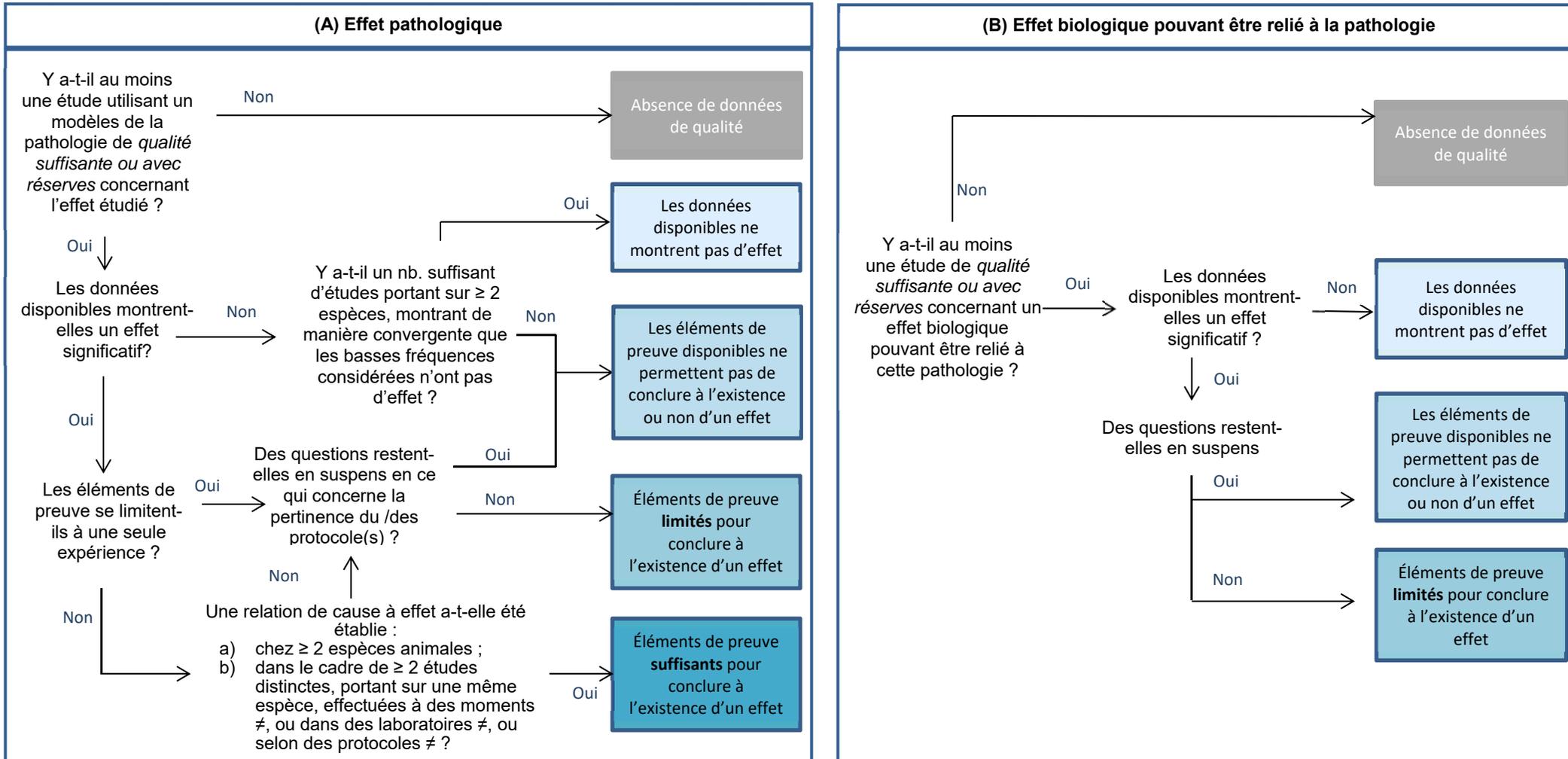


Figure 2 : logigramme d'évaluation des éléments de preuves relatifs à un effet pathologique (A), ou biologique pouvant être relié à la pathologie (B), dans les études sur les modèles expérimentaux

2.5.3 Évaluation globale

Afin de prendre en compte l'ensemble des connaissances scientifiques disponibles relatives à un effet sanitaire, les experts du groupe de travail ont rappelé, dans les paragraphes consacrés à l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires, les conclusions formulées par l'Anses dans son expertise précédente, et les résultats et conclusions des expertises réalisées par des organismes nationaux étrangers et internationaux.

Tous les éléments d'appréciation (données publiées avant et après 2010) sont examinés dans leur ensemble afin d'aboutir à une évaluation globale pour l'Homme de l'impact des champs électromagnétiques basses fréquences considérés, pour chaque effet étudié. Cette évaluation globale donne lieu, pour chaque effet sanitaire, à une classification finale du niveau de preuve selon les catégories définies ci-dessous (fortement inspirées de celles utilisées pour étudier la cancérogénicité d'un agent dans les monographies du Circ). Le classement d'un effet sanitaire résulte ainsi d'un processus d'évaluation collective et s'appuie sur les éléments d'appréciation extraits d'études sur l'Homme, l'animal de laboratoire et d'autres informations pertinentes (études *in vitro* par exemple).

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'Homme	Effet possible pour l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			Probablement pas d'effet chez l'Homme
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					

Figure 3 : évaluation du niveau de preuve pour un effet donné en fonction des éléments de preuve en faveur de l'existence d'un effet.

L'effet étudié est avéré pour l'Homme

Cette catégorie n'est utilisée que lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve suffisants* de l'existence de l'effet étudié pour l'Homme. Exceptionnellement, un effet peut être placé dans cette catégorie lorsque les éléments de preuve concernant l'effet pour l'Homme ne sont pas tout à fait suffisants, mais qu'il existe des *éléments de preuve suffisants* de l'existence de l'effet étudié chez l'animal de laboratoire et de fortes présomptions que l'agent considéré (les champs électromagnétiques basses fréquences) agisse suivant un mécanisme reconnu.

L'effet étudié est probable ou possible pour l'Homme

Cette catégorie comprend les effets considérés pour lesquels, au maximum, on a obtenu des éléments de preuve *limités* en faveur de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques et, au minimum, les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou alors on ne dispose d'aucune étude clinique ou épidémiologique, mais on dispose d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié *suffisants* dans les études chez l'animal. Ces effets sont alors classés soit dans la catégorie *effet probable pour l'Homme*, soit dans la catégorie *effet possible pour l'Homme* sur la base d'éléments de preuve issus des études épidémiologiques et expérimentales, de données mécanistiques et d'autres renseignements pertinents. Les termes *effet probable* et *effet possible* n'ont pas de signification quantitative et ne sont utilisés que pour décrire différents degrés d'éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet chez l'Homme, *effet probable* signifiant un niveau de preuve plus élevé qu'*effet possible* (où le doute est plus fort).

a- Effet probable pour l'Homme

On fait appel à cette catégorie lorsque l'on dispose d'éléments de preuve *limités* en faveur de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques et d'éléments de preuve *suffisants* chez l'animal de laboratoire. Dans certains cas, l'effet étudié peut être classé dans cette catégorie lorsque les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que les éléments de preuve sont inexistant dans les études cliniques et épidémiologiques et que les éléments de preuve sont *suffisants* pour l'animal de laboratoire et que de fortes présomptions que l'effet étudié s'effectue par un mécanisme qui est également plausible également chez l'Homme.

b- Effet possible pour l'Homme

Cette catégorie concerne les effets pour lesquels les éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié sont *limités* dans les études cliniques et épidémiologiques, et que les éléments de preuve chez l'animal de laboratoire sont limités, ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet, que l'on ne dispose pas de données de qualité ou que les données disponibles ne montrent pas d'effet. On peut également y faire appel lorsque les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de qualité dans les études cliniques et épidémiologiques, mais que l'on dispose d'éléments de preuve *suffisants* pour l'animal de laboratoire.

Dans certains cas, un effet sanitaire peut être classé dans ce groupe si les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou si l'on ne dispose pas de données de qualité dans les études cliniques et épidémiologiques, et que l'on dispose d'éléments de preuve *limités* chez l'animal de laboratoire corroborés par des données mécanistiques et d'autres données pertinentes. Un effet peut être classé dans cette catégorie sur la seule base d'indications solides provenant de données mécanistiques et autres.

Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'effet sanitaire étudié

Cette catégorie comprend essentiellement les effets étudiés pour lesquels :

- les éléments de preuve disponibles chez l'Homme ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet, ou on ne dispose pas de données de qualité, et dans le même temps les éléments de preuve sont au plus *limités* chez l'animal de laboratoire ;
- les données disponibles ne montrent pas d'effet chez l'Homme, et il n'est pas possible de déterminer que les données disponibles ne montrent pas d'effet chez l'animal de laboratoire.

Exceptionnellement, les effets étudiés pour lesquels les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de qualité dans les

études cliniques et épidémiologiques mais sont *suffisants* chez l'animal de laboratoire peuvent être classés dans cette catégorie lorsqu'il existe de fortes présomptions que le mécanisme d'action chez l'animal de laboratoire ne fonctionne pas chez l'Homme.

Probablement pas d'effet pour l'Homme

Relèvent de cette catégorie les effets étudiés pour lesquels on dispose d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* dans les études cliniques et épidémiologiques, ainsi que chez l'animal de laboratoire, pour un grand nombre de conditions ou de scénarios d'exposition. Il est très difficile de démontrer une absence d'effet.

Dans certains cas, peuvent être classés dans ce groupe des effets pour lesquels les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence d'un effet ou que l'on ne dispose pas de données de qualité dans les études épidémiologiques ou cliniques, mais pour lesquels on dispose d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* chez l'animal de laboratoire, constamment et fortement corroborées par une large gamme de données mécanistiques et d'autres données pertinentes.

3 Expertises des instances nationales et internationales

Les pouvoirs publics de nombreux pays se sont posé la question de l'impact sanitaire potentiel des champs électromagnétiques basses fréquences, notamment depuis que le Circ (IARC, 2002) a classé ces champs dans la catégorie 2B (« cancérogènes possibles pour l'Homme »). En France, les derniers rapports en date sur ce sujet sont ceux de l'Afsset et de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques⁹, tous deux parus en 2010. L'Union européenne, par l'intermédiaire de son Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (Scenih), a régulièrement publié des rapports sur le sujet (Scenih 2007, 2009, 2015). L'Union européenne a également soutenu des programmes spécifiques dont le but était d'analyser le niveau de risque lié aux champs basses fréquences. On peut citer le programme *Efhran* (*European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure*), ou le projet de recherche *Arimora*. Enfin, certains pays ont créé des comités interdisciplinaires pour analyser la littérature scientifique et faire le point sur l'état de l'art dans le domaine. La Suède publie ainsi annuellement des rapports d'expertise [SSM 2013, 2014, 2015 & 2016]. La Nouvelle-Zélande a également produit une synthèse sur le sujet en 2015¹⁰. Seuls les rapports d'expertise ayant procédé à une analyse critique de la littérature scientifique sont synthétisés ci-dessous. De façon exceptionnelle, le rapport de l'Afsset, qui a repris les analyses et les conclusions des précédents rapports d'expertise a été également décrit dans le but de fournir une connaissance historique des travaux de l'Agence dans le domaine des basses fréquences.

L'objet de ce chapitre est de rappeler les conclusions sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques basses fréquences formulées par différents comités d'experts à partir de l'analyse de la bibliographie scientifique disponible.

3.1 Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (2010)

En 2009, l'Afsset a mandaté des experts pour analyser les données scientifiques disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques basses fréquences sur la santé. Le rapport publié en mars 2010 soulignait que les effets à court terme des champs électromagnétiques basses fréquences sont connus et bien documentés. Ces effets ont été considérés pour établir les valeurs limites d'exposition aujourd'hui en vigueur. En ce qui concerne les effets possibles à long terme, la situation est différente, car les connaissances scientifiques sont moins solides. Les rapporteurs ont tout de même mis en avant la convergence des données épidémiologiques montrant une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences (valeur moyenne de 0,2 à 0,4 μ T) et la leucémie infantile. Cependant, cette association n'est soutenue par aucune étude expérimentale sur des modèles animaux ou cellulaires. Le rapport Afsset 2010 indiquait également qu'aucune relation n'avait pu être établie entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue d'autres types de pathologies, mais que l'hypothèse de l'implication de ces champs dans les maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer ou la sclérose latérale amyotrophique, ne pouvait pas être écartée. En ce qui concerne l'électrohypersensibilité (EHS), le rapport de l'Afsset soulignait la grande hétérogénéité de ce syndrome et concluait que les données analysées ne permettaient pas de le relier spécifiquement aux champs électromagnétiques basses fréquences.

⁹ Rapport parlementaire publié en Mai 2010, sous la direction du sénateur Daniel RAOUL : « Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension ».

¹⁰ Report from the Expert Committee appointed by the Norwegian Institute of Health, commissioned by the Ministry of Health and Care Services and the Ministry of Transport and Communications (2012). Low-level radiofrequency electromagnetic fields – an assessment of health risks and evaluation of regulatory practice.

En conclusion, les experts ont estimé qu'il existait des preuves limitées en faveur de la cancérogénicité des champs électromagnétiques basses fréquences chez l'homme (cas des leucémies de l'enfant), ce qui rejoignait les conclusions de l'évaluation de 2002 du Circ. Le manque de preuves expérimentales chez l'animal, et l'absence de mécanisme d'action plausible indiquaient que le classement déterminé en 2002 (catégorie 2B : « peut-être cancérogène pour l'Homme ») était toujours d'actualité.

De plus, l'absence d'éléments dans les résultats expérimentaux en faveur d'un lien de causalité entre l'exposition aux champs et les pathologies étudiées rendait impossible la prise en compte des effets potentiels à long terme pour l'établissement de valeurs limites d'exposition. L'Afsset n'avait donc pas remis en cause la position de l'Inirp basée sur les effets à court terme des basses fréquences.

3.2 Rapports du conseil scientifique du SSM (2013-2016)

L'autorité suédoise de radioprotection (SSM) publie annuellement une synthèse résumant les avancées scientifiques dans le domaine de l'exposition aux ondes électromagnétiques en relation avec la santé publique. Dans le cadre de ces rapports, de nombreuses publications portant sur les champs électromagnétiques basses fréquences sont analysées. Les principaux effets sur la santé qui ont été étudiés dans les rapports publiés entre 2013 et 2016 sont décrits ci-dessous. La plupart du temps, aucune association forte et cohérente n'a été trouvée.

Le SSM a considéré, dans ses différents rapports, que les études épidémiologiques publiées après le classement des champs électromagnétiques basses fréquences par le Circ, en 2002, confirmaient l'ensemble des études précédentes, à savoir l'existence d'une association entre l'exposition aux champs générés par les lignes HT et un risque accru de développer une leucémie lymphoblastique aiguë chez l'enfant. Néanmoins, le SSM considère qu'aucune avancée scientifique n'a été faite au niveau de la recherche expérimentale, et qu'aucun mécanisme plausible n'a pu être mis en évidence. Même l'utilisation récente d'un modèle murin pour la leucémie n'a pu fournir la preuve expérimentale qu'une exposition aux champs basses fréquences favorise l'apparition de ce type de cancer. Sans la confirmation par des études *in vivo* et *in vitro*, aucune relation de cause à effet ne peut être établie, et la question de savoir si les basses fréquences ont une influence sur le développement de la leucémie infantile reste encore en suspens.

En ce qui concerne le cancer du sein chez la femme, les rapports SSM soulignent que des progrès ont été accomplis, car les recherches récentes montrent de manière à peu près certaine, selon le SSM, qu'il n'y a pas de relation causale avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

D'anciennes études épidémiologiques en milieu professionnel avaient suggéré la possibilité d'un risque accru pour la maladie d'Alzheimer. Les études les plus récentes suggèrent une très légère tendance à l'augmentation du risque, sans pour autant écarter le fait que cette association soit le résultat d'un biais expérimental. Là aussi, aucune preuve expérimentale pouvant suggérer une relation causale n'est disponible dans la littérature scientifique.

Des études épidémiologiques avaient également indiqué un risque accru de sclérose latérale amyotrophique (SLA) chez les sujets exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences. L'hypothèse avait été émise que les chocs électriques, plutôt que des champs magnétiques, pourraient être à l'origine du développement de la SLA. Des études récentes ont évalué l'exposition particulière aux champs électromagnétiques basses fréquences et/ou aux chocs électriques en milieu professionnel. Les résultats de ces études étant contradictoires, le SSM considère que la question n'est toujours pas résolue. De plus, les études expérimentales effectuées ne viennent pas confirmer les observations épidémiologiques. Ainsi, l'utilisation d'un modèle animal pour la SLA n'a pas montré que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences avait un effet sur l'apparition de cette maladie.

Les nouvelles études s'intéressant à la maladie de Parkinson n'ont pas trouvé d'association avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Ces nouvelles données suggèrent donc l'absence d'un effet.

La même conclusion (absence d'un effet) peut être tirée des études concernant les maladies cardio-vasculaires, pour le SSM.

Enfin, les rapports SSM indiquent que des éléments de preuve ont été obtenus pour les effets de l'exposition aux basses fréquences sur l'activité électrique du cerveau. Cependant, ces effets ne semblent pas avoir d'impact sur la mémoire ou la cognition. À l'heure actuelle, on ne sait pas si ces effets peuvent conduire à des effets néfastes sur la santé. Néanmoins, dans les quelques études cliniques s'intéressant à des symptômes aigus tels que des maux de tête ou des étourdissements chez des volontaires humains, aucune association n'a été observée.

3.3 Efhran 2012

Afin de répondre aux besoins des décideurs européens en matière de santé publique, la commission européenne a financé un programme permettant la mise en place d'un réseau d'experts pour évaluer les risques éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques (*European Health Risk of Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure* ou Efhran d'après son acronyme). Les experts de ce programme se sont appuyés sur les résultats du projet de recherche européen EMF-NET (2009), de l'expertise publiée par le Scenihir en 2009 et d'études plus récentes. Ils ont notamment examiné les effets suivants :

- cancers (leucémie infantile, tumeurs cérébrales chez l'enfant, tumeur cérébrale chez l'adulte, cancer du sein chez l'adulte, autres cancers) ;
- maladies neurodégénératives (maladie d'Alzheimer, sclérose latérale amyotrophique, autres maladies neurodégénératives) ;
- effets sur la reproduction ;
- maladies cardiovasculaires ;
- bien-être (électro-hypersensibilité).

Pour aucun de ces effets, le niveau de preuve n'a été considéré comme suffisant pour établir une association causale entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de survenue de pathologie (Sienkiewicz *et al.*, 2010). Le terme « association causale » est important, car cela implique que les conclusions n'excluent pas la possibilité d'un lien, autre qu'une relation directe de cause à effet, entre l'exposition et le développement d'une maladie.

En l'état actuel des connaissances, les experts ont jugé que le niveau de preuve est limité pour conclure à une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de leucémie chez l'enfant. En effet, les études épidémiologiques ont montré, avec un certain degré de cohérence, une association significative entre l'exposition résidentielle aux champs magnétiques (à environ 0,3/0,4 μ T) et un doublement du risque de leucémie infantile, mais ces observations ne sont pas suffisamment robustes pour conclure à un effet causal pour les raisons suivantes :

- 1) aucun mécanisme moléculaire ou cellulaire connu ne peut pour l'instant expliquer un tel effet ;
- 2) dans l'ensemble, les études expérimentales ne montrent pas que les champs électromagnétiques basses fréquences puissent être cancérigènes ;
- 3) la combinaison du hasard, des biais et des facteurs de confusion peut avoir produit une association faussement positive dans les études épidémiologiques.

En ce qui concerne les autres types de cancer, les experts ont conclu que les preuves étaient insuffisantes pour formuler une conclusion. Dans certains cas, le classement « insuffisant » est le reflet d'un manque de données (ex : tumeurs cérébrales infantiles). Dans d'autres cas (tumeurs du cerveau chez les adultes), les études les plus récentes ont tendance à suggérer une absence d'association, mais en raison de résultats positifs trouvés dans des études antérieures, la classification en « preuves insuffisantes » a semblé être la plus appropriée par le groupe. Le

rapport conclut aussi à un manque de preuve pour toute association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le cancer du sein. Considérant le grand nombre d'études disponibles au moment de l'analyse, cette évaluation est considérée comme robuste par les auteurs.

En ce qui concerne les maladies neurodégénératives, les résultats ont été jugés non cohérents dans l'ensemble. Certaines études suggèrent une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la maladie d'Alzheimer. Néanmoins, les preuves ont été jugées comme insuffisantes et le rapport préconise de nouvelles études sur le sujet pour vérifier ce point important. Le rapport souligne aussi l'existence d'études indiquant une association entre la sclérose latérale amyotrophique et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Cependant, les données n'ont pas été jugées suffisamment cohérentes pour soutenir une classification autre que « insuffisante ».

Pour les maladies cardiovasculaires, les études analysées confirment selon le groupe d'experts l'absence de toute association. Les incertitudes concernant le rôle joué par les champs électromagnétiques dans la survenue de l'EHS impliquent une absence de preuve des champs électromagnétiques basses fréquences sur cette pathologie particulière.

3.4 Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (Scenihir - 2015)

Selon l'avis du comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (Scenihir) publié en 2015, les nouvelles études épidémiologiques sont cohérentes avec les conclusions antérieures et mettent en évidence une augmentation du risque de leucémie infantile associée à une exposition moyenne journalière entre 0,3 et 0,4 μT . Comme déjà évoqué dans les précédents avis du Scenihir, aucun mécanisme n'a été identifié à partir des études expérimentales qui pourrait soutenir ce résultat, ce qui, associé aux lacunes des études épidémiologiques, empêche une interprétation causale.

Comme signalé dans les précédents avis du Scenihir, les données suggèrent que les basses fréquences peuvent induire une génotoxicité et d'autres effets biologiques *in vitro* à des densités de flux magnétiques d'environ 100 μT et supérieures. Ces mécanismes ne sont pas établis, et la pertinence d'un lien avec la leucémie n'est pas certaine.

Les études investiguant les effets potentiels d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les puissances spectrales de l'électroencéphalogramme (EEG) en période d'éveil sont trop hétérogènes au regard des champs appliqués, de la durée d'exposition, du nombre de pistes investiguées, et des méthodes statistiques employées pour aboutir à une conclusion ferme. Ceci vaut également pour les effets sur le comportement et l'excitabilité corticale.

Les études épidémiologiques ne fournissent pas de preuves convaincantes d'une augmentation du risque de maladies neurodégénératives, y compris la démence, en lien avec une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Par ailleurs, le nombre d'issues défavorables de la grossesse ne semble pas être associé avec une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Les études concernant l'état de santé des enfants en relation avec une exposition résidentielle aux basses fréquences de la mère pendant la grossesse comprennent des limites méthodologiques qui doivent être prises en compte. Ceci implique que les études doivent être répliquées avant d'être utilisées pour une évaluation de risque.

Les études récentes ne montrent pas d'effet des basses fréquences sur la fonction de reproduction chez l'Homme.

3.5 Demande d'approfondissement de l'expertise scientifique relative aux conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques

En 2013, l'Anses a été saisie pour approfondir l'expertise scientifique relative aux conséquences d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques. L'expertise aboutit aux conclusions suivantes :

1. Les conséquences physiologiques des champs électromagnétiques basses fréquences ne sont pas clairement caractérisées. La majorité des auteurs des publications originelles ainsi que les rapporteurs de ce document s'accordent sur un trop faible nombre d'études bien menées et ciblant plus précisément les animaux d'élevage.
2. Une difficulté majeure pour comprendre les effets des champs électromagnétiques est l'absence d'hypothèse sur les mécanismes d'action de ces champs sur les organismes.
 - Le comportement et les effets neurobiologiques

Il n'y a pas d'effet clairement identifié des basses fréquences sur le comportement des animaux d'élevage, même si chez les rongeurs, il a été observé dans certains cas une dégradation des fonctions cognitives (apprentissage et mémorisation) à des niveaux d'exposition supérieurs à 100 μ T.

- Les performances zootechniques et sanitaires

Les effets des champs électromagnétiques basses fréquences ont été étudiés chez différentes espèces d'animaux de rente. Chez les bovins, il est rapporté lors d'essais en conditions contrôlées (30 μ T, 30 jours) une possible baisse de la production laitière, du taux butyreux et une augmentation de l'ingestion. En revanche, les publications ne montrent pas d'effets clairs sur la fertilité, la production laitière et la santé dans des essais de terrain, conduits à proximité de lignes à haute ou très haute tension¹¹.

Chez les volailles, il a été rapporté que l'exposition à des champs basses fréquences pouvait conduire à une plus forte mortalité et une inhibition du développement embryonnaire, tandis que l'effet tératogène est controversé. Cependant, quelques effets favorables ont été décrits : résistance à la coccidiose, amélioration des fonctions de reproduction chez certains oiseaux.

Chez le porc, de possibles effets défavorables sur le pouvoir de fertilité ont été observés sur les spermatozoïdes exposés *in vitro* ou *in vivo* aux champs électromagnétiques.

- Les hypothèses mécanistiques des effets des champs électromagnétiques

Deux grands types de mécanismes biologiques ont été avancés pour expliquer les effets des basses fréquences sur la santé animale : les effets sur les rythmes circadiens et les effets génotoxiques directs ou indirects.

Plusieurs études ont montré un changement du rythme circadien induit par les champs électromagnétiques basses fréquences : une interaction des champs avec le fonctionnement des cryptochromes a été avancée.

Les champs électromagnétiques basses fréquences pourraient avoir un effet génotoxique et surtout être capables d'amplifier les effets génotoxiques d'autres agents. Par ailleurs, les basses fréquences semblent augmenter les effets d'un stress oxydant, ce qui pourrait expliquer l'effet de ces ondes sur l'ADN. Cependant, ces mécanismes demeurent encore hypothétiques. Par ailleurs,

¹¹ La norme NF C 18-510 définit les domaines de tension suivants en courant alternatif : la très basse tension inférieure à 50 V, la basse tension entre 50 V et 1 000 V et la haute tension au-dessus de 1 000 V. La haute tension A (HTA) concerne les tensions entre 1 000 V et 50 000 V. La haute tension B (HTB) concerne les tensions au-dessus de 50 000 V. Les termes haute tension et très haute tension sont parfois utilisés notamment par le gestionnaire du transport d'électricité (RTE), pour désigner les lignes à 63 kV et 90 kV (haute tension) et à 225 kV et 400 kV (très haute tension).

toutes les tentatives cherchant à associer les champs électromagnétiques basses fréquences à des dysfonctionnements du système immunitaire et au stress physiologique sont restées infructueuses.

3.6 Conclusions sur les expertises réalisées par d'autres organismes

Il ressort de la lecture des différents rapports d'expertise nationaux et/ou internationaux que les principales inquiétudes sur lesquelles se penche la recherche scientifique concernent les effets des champs électromagnétiques basses fréquences sur :

- la cancérogénèse ;
- les maladies neurodégénératives ;
- l'électro-hypersensibilité ;
- le cerveau.

Ces rapports montrent une grande cohérence dans leurs conclusions respectives. En ce qui concerne la leucémie infantile, tous ces documents notent la crédibilité des observations épidémiologiques. En cela, les instances sont en accord avec le classement du Circ. Il y a également unanimité sur le fait qu'aucune donnée expérimentale sur des modèles *in vivo* ou *in vitro* ne vient renforcer cette observation. Le lien de cause à effet n'est donc pour l'instant pas établi. Pour les autres types de cancer, notamment le cancer du sein, un temps soupçonné, une relation causale avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences semble de moins en moins crédible, pour ces instances. Concernant les maladies neurodégénératives, les preuves sont jugées insuffisantes dans l'ensemble des cas, bien que certaines observations épidémiologiques suggèrent que l'implication des champs électromagnétiques basses fréquences dans l'apparition de la maladie d'Alzheimer ou de la sclérose latérale amyotrophique ne puisse être écartée. Enfin, aucune relation entre les basses fréquences et d'autres pathologies que celles citées ci-dessus n'a pu être établie.

4 État des lieux de la réglementation

4.1 Méthode de construction des valeurs limites d'exposition

L'établissement des valeurs limites d'exposition réglementaires s'appuie, dans beaucoup de pays, sur les travaux de la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp). L'approche générale de l'Icnirp a d'abord été publiée dans un article qui concerne l'ensemble des fréquences de 0 Hz (non compris) à 300 GHz (Icnirp, 1998). D'autres publications concernant notamment le domaine des basses fréquences ont fait ensuite l'objet d'articles scientifiques publiés par cette commission [Icnirp, 2003 ; Icnirp, 2010].

Dans ces publications, l'Icnirp a examiné l'ensemble des effets sur la santé documentés dans la littérature. L'analyse a pris en compte la qualité, la reproductibilité et la cohérence des études, et au final la commission n'a retenu que les effets réputés avérés pour proposer des valeurs limites d'exposition. Les résultats obtenus sur des cellules *in vitro* n'ont pas été retenus, car l'Icnirp considérait qu'ils n'étaient pas suffisamment pertinents pour pouvoir servir de base à une ligne directrice. Par ailleurs, l'Icnirp considère qu'il n'existe pas aujourd'hui de preuve scientifique convaincante, dans les domaines de l'épidémiologie et de la biologie, permettant de conclure à l'existence d'effets sanitaires à long terme comme le cancer ou des pathologies dégénératives.

Pour comprendre le fondement de la construction de ces valeurs limites, il faut donc se référer aux modes d'action connus et avérés des champs électromagnétiques basses fréquences sur le vivant. Aux basses fréquences, le champ électrique externe pénètre très peu à l'intérieur du corps, ce qui a pour conséquence de générer principalement des courants superficiels à la surface de la peau. Le champ magnétique, quant à lui, peut traverser le corps et produire des courants induits internes. À de très hautes intensités de champ magnétique, ces courants induits peuvent être suffisamment forts pour avoir une action sur le système nerveux. Ainsi, les effets biologiques avérés retenus pour la rédaction des lignes directrices dans le domaine des basses fréquences sont de deux ordres :

- réponses biologiques pouvant aller de la perception légère à la douleur, dues aux effets de charges électriques de surface ;
- stimulation du tissu nerveux central (CNS - *Central Nerve Stimulation*) et périphérique (PNS – *Peripheral Nerve Stimulation*)¹².

Pour éviter l'apparition de ces effets, l'Icnirp a défini des valeurs limites d'exposition. Ces limites sont appelées « restrictions de base » et le non-dépassement de ces valeurs assure la protection contre les effets biologiques avérés des champs électromagnétiques basses fréquences. De façon à faciliter la vérification de la conformité à ces valeurs limites, l'Icnirp a également défini des « niveaux de référence », qui correspondent à des grandeurs physiques plus facilement mesurables et dont le respect assure le non-dépassement des restrictions de base. Dans la législation appliquée aux travailleurs, les termes « restrictions de base » et « niveaux de référence » peuvent être respectivement remplacés par les termes « valeurs limites d'exposition (VLE) » et « valeurs déclenchant l'action (VA) » (cf. 4.3.2).

4.1.1 Les restrictions de base

Ce terme couvre les valeurs d'indicateurs dépendant de l'exposition aux champs électrique, magnétique et électromagnétique au-delà desquelles il est démontré un déclenchement des effets

¹² Pour la stimulation des tissus nerveux, l'apparition de phosphènes qui correspondent à des sensations d'éclairs lumineux, bleutés ou blancs, ont été principalement investiguées. Ces phosphènes sont liés à l'excitation de la rétine. Il faut noter que la rétine fait partie du système nerveux central et qu'elle est considérée comme un modèle fiable des effets des champs électriques induits sur le système neuronal en général.

sanitaires sur l'organisme humain. En fonction de la gamme de fréquences du rayonnement incident sur le corps, ces restrictions de base sont présentées sous forme :

- d'induction magnétique (B) ;
- de champ électrique interne (E) ;
- de densité de courant induit (J) ;

En ce qui concerne les champs électromagnétiques basses fréquences ($0 \text{ Hz} < f \leq$ quelques kilohertz), les restrictions de base ont été établies en fonction des densités de courant pouvant avoir des effets sur les fonctions du système nerveux central, qui correspond au système réceptif le plus sensible. L'Icnirp, en 1998, a recommandé, pour les fréquences dans la gamme de 4 Hz à 1 kHz, que l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques n'induisse pas de densités de courant inférieures à 10 mA.m^{-2} . Cette valeur a été déterminée à partir du niveau induisant un effet sur le système nerveux central (100 mA.m^{-2}), divisé par un facteur de sécurité de 10. Pour le grand public, une sécurité supplémentaire d'un facteur 5 est appliquée, donnant une restriction de base de 2 mA.m^{-2} .

L'Icnirp a édité en 2010 un document spécifique aux basses fréquences (Icnirp - 2010)¹³ venant compléter et modifier l'édition de 1998 et donnant les lignes directrices pour la protection des êtres humains exposés à des champs électriques et magnétiques dans la gamme de fréquences de 1 Hz à 100 kHz. Dans ce nouveau document, les restrictions de base ne sont plus exprimées en densité de courant, mais en intensité de champs induits. L'Icnirp explique qu'en 1998, les données disponibles pour les évaluations de risques étaient fondées sur la mesure de la densité de courant induit. Cependant, en 2010, suffisamment d'informations utilisant le champ électrique induit à l'intérieur du corps ont pu être rassemblées pour utiliser cette grandeur. Ainsi, le champ électrique interne (E_i) est maintenant considéré car il est le principal facteur de perturbation des cellules nerveuses. Les restrictions de base sont données dans le Tableau 3 et varient de 0,1 V/m à 1,35 kV/m entre 1 Hz et 10 MHz. Ce tableau indique que la plage de fréquences où le système nerveux central est le plus sensible se situe entre 10 Hz et 25 Hz. Dans cette plage, le niveau de champ électrique à partir duquel la rétine et les cellules nerveuses du cerveau sont sensibles est évalué à 50 mV/m. Entre 25 et 400 Hz, le niveau limite dépend de la fréquence, et à 50 Hz, la valeur limite a été évaluée à 100 mV/m. Pour le système nerveux périphérique, le niveau de sensibilité est constant jusqu'à 400 Hz et se situe autour de 800 V/m. Pour la population générale, les restrictions de base sont calculées à partir de ces valeurs en prenant en compte un facteur 2 à 5 comme marge de sécurité, ce qui à 50 Hz descend la valeur limite à 20 mV/m pour le système nerveux central, et à 400 mV/m pour le système nerveux périphérique. En régime impulsionnel ou transitoire, en basses fréquences, l'Icnirp recommande de ne pas moyenniser l'impulsion, mais de prendre en compte la valeur crête instantanée du champ électrique.

L'utilisation des champs électriques internes plutôt que la densité de courant comme grandeur de référence pour les restrictions de base est justifiée par l'Icnirp par le fait qu'ils sont directement responsables de l'activation des cellules nerveuses et autres cellules électrosensibles. Cependant, la quantification des restrictions de base est toujours aussi difficilement réalisable, car les champs doivent être évalués à l'intérieur du corps humain. Afin de faciliter la vérification du respect des valeurs limites, l'Icnirp propose d'autres grandeurs (champ électrique et champ magnétique externes, notamment), plus facilement mesurables. Des simulations numériques utilisant des mesures de champ externes ont permis de déterminer, pour ces grandeurs, des niveaux, dits « de référence », dont le respect permet d'atteindre l'objectif de sécurité poursuivi.

¹³ *Icnirp guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields* [ICNIRP, 2010].

Tableau 3 : restrictions de base pour l'exposition humaine aux champs électrique et magnétique [Icnirp, 2010]

Caractéristiques de l'exposition	Domaine de fréquences	Champ électrique interne V.m ⁻¹
Travailleurs		
Tissus de la tête appartenant au SNC	1 - 10 Hz	0,5 / f
	10 Hz - 25 Hz	0,05
	25 Hz - 400 Hz	2 x 10 ⁻³ f
	400 Hz - 3 kHz	0,8
	3 kHz - 10 MHz	2,7 x 10 ⁻⁴ f
Tous les tissus autres de la tête et du corps	1 Hz - 3 kHz	0,8
	3 kHz - 10 MHz	2,7 x 10 ⁻⁴ f
Population générale		
Tissus de la tête appartenant au SNC	1 - 10 Hz	0,1 / f
	10 Hz - 25 Hz	0,01
	25 Hz - 1000 Hz	4 x 10 ⁻⁴ f
	1000 Hz - 3 kHz	0,4
	3 kHz - 10 MHz	1,35 x 10 ⁻⁴ f
Tous les tissus autres de la tête et du corps	1 Hz - 3 kHz	0,4
	3 kHz - 10 MHz	1,35 x 10 ⁻⁴ f

Notes :

- f est la fréquence, en Hz
- toutes les valeurs sont des moyennes quadratiques (rms).
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des restrictions de base spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

4.1.2 Les niveaux de référence

L'intensité du champ électrique induit étant difficile à évaluer, des niveaux de référence de l'exposition aux champs électrique et magnétique externes sont déterminés de façon à faciliter l'évaluation de l'exposition environnementale et le respect des restrictions de base. Ces paramètres sont connus sous l'appellation de « niveaux de référence » et sont fondés soit sur des modèles mathématiques de l'absorption par le corps humain de l'énergie électromagnétique, soit sur l'extrapolation de données expérimentales mesurées par exemple sur un fantôme présentant les mêmes caractéristiques physiologiques.

Pour les champs électromagnétiques basses fréquences, les niveaux de référence sont exprimés en valeur de champ électrique ou de champ (ou d'induction) magnétique. Ces niveaux tiennent compte de marges de sécurité établies en considérant un très large éventail de situations d'exposition possibles, de telle sorte que, selon l'Icnirp, dans toutes les configurations d'exposition usuelles, le respect des niveaux de référence entraîne obligatoirement le respect des restrictions de base correspondantes. Par contre, l'inverse n'est pas obligatoirement vrai et si une valeur d'exposition, mesurée ou calculée, dépasse le niveau de référence, cela n'implique pas nécessairement que la restriction de base soit dépassée. Toutefois, tout dépassement du niveau de référence nécessitera une action et imposera de vérifier le respect de la restriction de base correspondante et de déterminer si des mesures de protection complémentaires sont nécessaires.

Dans les lignes directrices pour la protection contre les rayonnements non ionisants de l'Icnirp publiées en 1998, les analyses avaient établies qu'à 50 Hz, des niveaux d'expositions de 100 µT

correspondaient à des densités de courant comprises entre 0,2 et 2 mA.m⁻², ce qui garantit le respect des restrictions de bases pour le grand public. À 50 Hz, le niveau de référence pour les travailleurs est 5 fois plus élevé (comme pour les restrictions de base), ce qui correspond à une valeur de 500 µT.

Dans la mise à jour spécifique aux basses fréquences (Icnirp - 2010), le changement des indicateurs de référence pour la détermination des restrictions de base a eu pour conséquence de modifier les niveaux de référence. À 50 Hz, le niveau de référence passe à 200 µT pour le grand public, et la valeur limite pour les travailleurs a été relevée à 1 000 µT (Tableau 4 et Tableau 5).

Tableau 4 : niveaux de référence pour l'exposition du public aux champs électrique et magnétique [INRS, 2011]

Domaine de fréquences	Intensité de champ électrique E (kV.m ⁻¹)	Intensité de champ magnétique H (A.m ⁻¹)	Densité de flux magnétique B (T)
1 Hz – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz – 50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
50 Hz – 400 Hz	$2,5 \times 10^2 / f$	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2 / f$	$6,4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

Notes :

- f est la fréquence, en Hz,
- pour des recommandations en régime non sinusoïdal et à des fréquences multiples, voir les sections spécifiques ci-après,
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

Tableau 5 : niveaux de référence pour l'exposition des travailleurs aux champs électrique et magnétique [INRS, 2011]

Domaine de fréquences	Intensité de champ électrique E (kV.m ⁻¹)	Intensité de champ magnétique H (A.m ⁻¹)	Densité de flux magnétique B (T)
1 Hz – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$0,2 / f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2,4 \times 10^5 / f$	$0,3 / f$
3 kHz – 10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	1×10^{-4}

Notes :

- f est la fréquence, en Hz,
- pour des recommandations en régime non sinusoïdal et à des fréquences multiples, voir les sections spécifiques ci-après,
- pour prévenir les effets indirects, en particulier dans les champs électriques de forte intensité, voir le chapitre intitulé « Mesures de prévention »,
- dans la gamme des fréquences dépassant 100 kHz, il faut en plus tenir compte des niveaux de référence spécifiques aux radiofréquences (« RF »).

4.1.3 Comparaison des restrictions de base et des niveaux de référence des lignes directrices de l'Icnirp 1998 et 2010

Après analyse des deux documents, il est possible de formuler les principales remarques suivantes :

- les fréquences de coupure qui constituaient les classes de fréquence ont varié ;
- dans les nouvelles recommandations de 2010, il y a également des fréquences nouvelles entre « professionnels » et « population générale ». C'est le cas pour les restrictions de base où une limite à 400 Hz pour les « professionnels » passe à 1 000 Hz pour la « population générale » ;
- pour les niveaux de référence, un point d'inflexion est introduit à la fréquence 50 Hz pour la population générale, alors qu'il n'existe pas pour le monde professionnel ;
- les niveaux de référence à 50 Hz sont augmentés ;
- le ratio entre les niveaux « professionnels » et « population générale » est variable entre un rapport 2 à 5 (en 1998, il était constant à 5) ;
- des diminutions de seuil apparaissent en champ électrique entre 1 kHz et 3 MHz, où les limites passent de 610 V/m à 170 V/m.

Enfin, même si les grandeurs physiques ont changé pour les restrictions de base, elles restent toujours hors de portée de mesures simples (champ électrique interne).

Il faut noter que c'est à la suite de la parution en 1998 du premier document de l'Icnirp que les recommandations et directives européennes ont été adoptées. Comme il sera vu dans le paragraphe suivant, la législation en France et dans de nombreux pays se base donc sur les niveaux de référence établis en 1998 et non sur ceux modifiés en 2010. Le document de l'Icnirp de 2010 a servi de base pour l'établissement de valeur limites en milieu professionnel au niveau européen, transposées par la suite en droit français.

4.2 Réglementations sur l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à travers le monde¹⁴

4.2.1 Contexte

Les évaluations du risque pour la santé, fondées sur l'analyse de la littérature scientifique concernant l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, fournissent le socle à partir duquel les lignes directrices internationales et nationales pour limiter l'exposition aux champs électromagnétiques sont construites. Ces lignes directrices servent fréquemment de guide pour l'établissement des valeurs limites d'exposition réglementaires nationales. Les réglementations de la plupart des pays européens occidentaux sont ainsi fondées sur des effets sanitaires aigus provoqués par une exposition aux champs électromagnétiques à des niveaux non rencontrés habituellement dans l'environnement.

Certains pays définissent leurs recommandations ou réglementation en matière d'exposition après avoir conduit une revue formelle de la littérature scientifique. Cependant, la plupart des réglementations spécifiques à chaque pays pour les champs électromagnétiques basses fréquences sont fondées sur les lignes directrices proposées par l'Icnirp (Icnirp, 1998 ou 2010). D'autres lignes directrices existent, comme celles de l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) IEEE C95.6-2002, qui sont adoptées aux États-Unis de façon volontaire au niveau des états. En Europe, les recommandations les plus récentes pour l'exposition du public aux champs électromagnétiques sont celles du Conseil de l'Europe (1999/519/EC), qui recommande aux états membres d'intégrer les niveaux d'exposition définis en 1998 par l'Icnirp dans leur législation nationale.

Les lignes directrices s'appliquant à la population professionnelle sont également inspirées des lignes directrices de l'Icnirp et de l'IEEE mentionnées précédemment. La réglementation concernant l'exposition professionnelle en Nouvelle-Zélande, aux Philippines, en Corée du sud et en Iran par exemple s'appuient sur les lignes directrices de l'Icnirp. Aux États-Unis, ce sont les lignes directrices de l'ACGIH¹⁵ qui sont utilisées. Celles-ci sont publiées annuellement et sont référencées et utilisées dans d'autres pays (par exemple le Canada et Israël). En Europe, les lignes directrices pour la limitation de l'exposition des professionnels sont issues de la directive 2013/35/UE du parlement et du conseil européen et devaient être transposées dans le droit national pour tous les pays membres au 1^{er} juillet 2016.

4.2.2 Réglementations nationales pour la protection du public

L'évaluation des politiques de gestion des risques doit prendre en compte deux paramètres : le contenu (niveau de contrainte) apporté par la réglementation, et son statut, qui conditionne son application (de la simple recommandation à l'obligation réglementaire). En effet, certains pays peuvent afficher une réglementation très stricte mais qui n'est pas forcément mise en œuvre. Par conséquent, il peut être trompeur de comparer seulement le niveau de sévérité de la réglementation sans prendre en compte son application réelle.

Ainsi, bien que les bases scientifiques qui servent à évaluer les risques sanitaires sont identiques pour tous les pays, leur interprétation peut différer, aboutissant ainsi à une réglementation différente d'un pays à l'autre.

¹⁴ Basé sur les études du projet des états membres de l'OMS en 2006 et 2013-2016 et sur la base de données de l'OMS *Worldwide EMF standards*.

¹⁵ *American Conference of Governmental Industrial Hygienists: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. <http://www.acgih.org/>

L'organisation mondiale de la santé a créé une base de données régulièrement mise à jour récapitulant les réglementations à travers le monde¹⁶. Le chapitre ci-dessous compare les politiques appliquées dans les différents pays en fonction de leur sévérité et du mode d'application pour la population générale.

4.2.2.1 Absence de réglementation nationale ou contraintes minimales

Trois types de situations peuvent être rencontrés :

- Certains pays n'ont pas de dispositif réglementaire formel¹⁷. Le développement de la réglementation est en cours pour certains de ces pays (par exemple, l'Arménie, l'Inde, le Kazakhstan, la Malaisie, la Mongolie, la Thaïlande, l'Ouzbékistan) alors qu'il n'est pas d'actualité pour d'autres (Cuba, Tunisie).
- Certains pays comme les États-Unis et le Canada ont estimé, sur la base de l'analyse de la littérature scientifique sur le sujet, que le niveau de preuve n'était pas suffisant pour justifier une action forte au niveau fédéral. Toutefois, certains États et les provinces qui les composent ont pu établir des mesures de gestion. En Europe, la Belgique n'a pas de politique nationale et a promulgué une réglementation régionale. Certains pays (par exemple l'Australie, le Finlande, la Grande-Bretagne) permettent des expositions moins strictes que les lignes directrices internationales pour des délais limités (heures ou minutes pendant la journée).

4.2.2.2 Adoption volontaire de lignes directrices internationales, sans application

Certains pays ont adopté *de facto* les lignes directrices internationales concernant l'exposition de la population générale, mais ne les appliquent pas car elles n'ont pas été transposées dans la législation.

4.2.2.3 Transposition des lignes directrices internationales dans la législation

Quelques pays ont intégré dans leur législation nationale un cadre de protection fondé sur les directives internationales. Il s'agit notamment du Bahreïn, du Brésil, de Chypre, de l'Allemagne, de la France, de la Grèce, de l'Italie, de la Nouvelle-Zélande, de la Norvège, du Pérou, des Philippines, du Portugal et de la Suisse.

4.2.2.4 Réglementation plus stricte que les lignes directrices internationales

Certains pays ont adopté une réglementation plus stricte que les lignes directrices internationales pour des raisons diverses : interprétation différente du niveau de preuve scientifique, raisons sociétales propres au pays, etc. Ces pays ont fondé leur politique sur leur propre évaluation des risques (Argentine, Chine, Pologne et Russie).

4.2.2.5 Réglementation basée sur le principe de précaution

En raison des nombreuses incertitudes concernant les effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, certains décideurs politiques ont eu recours au

¹⁶ <http://www.who.int/peh-emf/standards/en/>.

¹⁷ La liste des pays mentionnés ici n'est pas exhaustive. Il est important de souligner qu'il existe davantage de pays que ceux énoncés ici qui n'ont pas de politique formelle, car il s'agit d'une photographie instantanée des pays qui s'intéressent à la question des champs électromagnétiques et participent au projet international EMF de l'OMS.

principe de précaution dans leur orientation politique¹⁸. Ce principe a été utilisé à plusieurs reprises dans la réglementation environnementale cette dernière décennie ((EC Communication 2000¹⁹, Sunstein 2002²⁰; Tickner 2003²¹). Ici aussi, son interprétation peut varier d'un pays à l'autre et a donné naissance à des réglementations différentes qui sont décrites ci-dessous.

Certains pays (listés plus haut), qui ont adopté des lignes directrices internationales (d'application volontaire ou obligatoire), ont complété leur politique nationale en y intégrant le principe de précaution.

➤ **Limites tenant compte du principe de précaution**

Les pays suivants ont appliqué le principe de précaution dans leur droit national et ont établi des lignes directrices plus strictes.

La Suisse a introduit le principe de précaution dans sa loi sur les rayonnements non ionisants de 1999. Son ordonnance limite l'exposition au champ magnétique des installations fixes comme les lignes à haute tension, les sous-stations, les postes d'interconnexion et de transformation, les installations électriques domestiques, les rails et les postes de transmission et radars. La limite d'exposition pour les champs magnétiques a été fixée à 100 μ T pour la population générale. De plus, individuellement, chaque installation de distribution électrique ne doit pas occasionner une exposition de plus de 1 μ T. Ces valeurs limites sont fondées sur le niveau d'exposition le plus bas possible compte tenu des considérations techniques et économiques. Des dérogations pour les nouvelles installations peuvent être accordées pour des raisons techniques ou de coût. Ces limites de précaution ne sont pas applicables aux installations déjà existantes à phasage optimisé²².

L'Italie a formulé un décret national prenant en compte le principe de précaution dans l'établissement des valeurs limites d'exposition en 2003. Le décret indique 3 niveaux d'exposition. Pour la population générale, la limite d'exposition aux champs magnétiques basses fréquences est de 100 μ T. De plus, ces lignes directrices introduisent 2 valeurs limites supplémentaires pour les lignes à haute tension :

- la valeur de 10 μ T (médiane sur 24 h) pour une exposition de plus de 4 heures par jour
- un objectif de qualité de 3 μ T qui s'applique aux nouvelles lignes et aux nouvelles habitations.

¹⁸ En 2000, la Commission européenne a approuvé une importante communication sur le principe de précaution fournissant des lignes directrices « transparentes sur le plan politique » pour l'application de ce principe, appuyé par une évaluation des risques scientifiquement fondée, décourageant ainsi son utilisation arbitraire. Selon cette communication, les mesures basées sur le principe de précaution doivent être : adaptées au niveau de protection choisi, non discriminatoires dans leur application (c'est-à-dire qu'elles doivent traiter des situations comparables de façon similaire), pertinentes avec les mesures déjà en place (c'est-à-dire qu'elles doivent être comparables en matière de portée et de nature aux mesures en place dans des domaines équivalents pour lesquels des données scientifiques sont disponibles), basées sur une analyse des bénéfices potentiels et des coûts de l'action ou de l'absence d'action (incluant, si pertinent et faisable, une analyse économique coût/bénéfice), de nature provisoire (c'est-à-dire sujet à examen à la lumière de nouvelles données scientifiques et capable de confier la responsabilité de produire les preuves scientifiques nécessaires à une évaluation plus complète des risques).

¹⁹ European Commission, "Communication from the Commission on the precautionary principle". COM (2000) I. 02.02. 2000. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52000DC0001&from=FR>

²⁰ Tickner, J.A (2003). *Precaution, Environmental Science and Preventative Public Policy*. Island Press.

²¹ Sunstein, C.R. (2002). *Risk and Reason*. Cambridge University Press.

²² Généralement appelée « phase transposée » - où les phases de lignes aériennes comportant deux circuits (chaque ligne comportant trois faisceaux ou phases de conducteurs) sur le même pylône sont placées dans un ordre spécifique qui permet au champ magnétique sur les côtés des lignes d'être le plus bas.

Depuis 2011, le niveau de référence de 100 μT (basé sur les lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998) a été considéré comme la valeur « limite pour la santé » en Israël et a servi dans l'établissement des lignes directrices pour l'exposition à court terme. Une « limite d'exposition environnementale » supplémentaire a été introduite pour l'exposition à long terme (exposition de plus de 4 h pendant 5 jours par semaine) et a été fixée à 0,4 μT (moyenné sur 24 heures, le jour de l'année où la consommation d'électricité est la plus élevée).

➤ **Autres formes de principe de précaution**

Certains pays ont décidé de mettre en œuvre le principe de précaution en tant qu'« Acte réglementaire souple », signifiant que cette exigence n'est pas incorporée dans la législation nationale.

▪ **Statu quo : le but est de ne pas augmenter l'exposition**

Les nouvelles installations ne doivent pas produire plus de champs que les installations existantes. Alors qu'il n'existe pas de valeur limite d'exposition nationale aux États-Unis, certains états et certaines localités limitent l'exposition au niveau de l'emprise au sol de la ligne haute tension (dont la largeur varie avec la tension). Ces limites établies par la réglementation dans certains états sont de l'ordre de 10 kV/m dans l'emprise pour le champ électrique et de 15 à 25 μT (dans les conditions de charge maximale) pour les champs magnétiques. Le but de cette réglementation est que, par mesure de précaution, les nouvelles lignes électriques ne produisent pas de champs plus importants que les lignes existantes.

▪ **Réduction de l'exposition : le but est de réduire l'exposition de la population générale aux champs magnétiques**

Cela peut prendre la forme d'un avis général visant à réduire l'exposition ou à établir un plan de réduction de l'exposition, qui peut être mis en pratique selon différents critères :

- la réduction des expositions à coût faible ou minimal : en Australie, chaque nouvelle réglementation doit être justifiée par une analyse coût/efficacité. Il a donc été recommandé de laisser les valeurs limites comme une recommandation et de ne pas les incorporer dans la législation australienne en raison des coûts élevés de mise en conformité attendus ;
- la réduction des points d'exposition « s'écartant radicalement de ce qui serait considéré comme normal ». Par exemple, la Suède a recommandé de réduire les expositions « s'écartant radicalement de ce qui serait considéré comme normal » à « des frais raisonnables et avec des conséquences raisonnables dans tous les autres aspects » (*Swedish Work Environment Authority, 2005*²³). La formulation est vague et peut être interprétée de différentes manières, impliquant ainsi des approches différentes. Que signifie « un niveau de champ magnétique normal ? ». La valeur médiane d'exposition des foyers et des crèches des grandes villes de Suède est d'environ 0,1 μT , et 10 % des foyers a au moins une chambre avec un champ magnétique supérieur à 0,2 μT . Ceci suggère donc, sans être explicite, que de « s'écarter radicalement de la normale » signifie dépasser significativement ces valeurs ;
- la réduction des niveaux d'exposition aussi bas que pratiquement réalisable et devant être justifiés s'ils dépassent 0,4 μT est la recommandation pour de nouvelles installations (par exemple, crèches, écoles et habitations) en Norvège depuis 2005 ;

²³ *Low frequency electric and magnetic: the precautionary principle for national authorities. Guidance for decision makers.* <https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/broschyrrer/english/low-frequency-electrical-and-magnetic-fields-adi478.pdf>.

- l'établissement d'un budget est une autre forme de réduction, c'est-à-dire en fixant un pourcentage du coût du projet ou en fixant un budget préétabli visant la réduction de l'exposition. Par exemple, dans l'État de Californie aux États-Unis, jusqu'à 4 % du coût du projet peut être consacré à la réduction du niveau de champ électromagnétique sur le terrain, à condition qu'une réduction substantielle des expositions puisse être atteinte. En Israël, un budget annuel de 2 millions de dollars est prévu pour réduire l'exposition.

- **Réglementation de l'aménagement**

Au lieu de limiter les expositions sur la base de réglementations sanitaires environnementales, certains pays ont choisi d'intégrer le principe de précaution en limitant la construction de nouvelles installations à une certaine distance ou en imposant une valeur limite d'exposition aux zones « sensibles » (par exemple immeubles résidentiels, écoles, hôpitaux, etc.). Quelques exemples sont présentés ici.

- **Instauration de distances minimales entre les zones résidentielles et les installations**

En Irlande, la compagnie d'électricité n'est pas autorisée à construire de nouvelles lignes de transport ou de sous-stations à moins de 22 mètres d'un bâtiment existant et il est interdit à quiconque de construire de nouveaux bâtiments dans cet espace.

Au Luxembourg, le ministère de l'intérieur recommande de ne pas créer de nouvelles zones résidentielles à moins de 30 mètres des lignes aériennes à haute tension, mais cette recommandation ne restreint pas la construction dans les zones résidentielles existantes²⁴.

Dans l'État du Connecticut, aux États-Unis, des zones tampon de 300 pieds (91 m) ont été proposées pour les nouvelles lignes aériennes de transport de l'électricité de 345 kV et plus.

En Israël, les nouvelles lignes ne peuvent être construites à une distance de moins de 35 m pour les lignes aériennes de 400 kV ; 20 m pour les lignes 161 kV ; 3 m pour les lignes 110 kV et 3 m pour les lignes 11-36 kV. Les transformateurs intérieurs doivent être à 3 m de tout mur partagé par une pièce résidentielle.

- **Valeur limite d'exposition pour les nouvelles installations dans les zones résidentielles**

Une limite de 10 μT a été fixée en Slovénie pour de nouvelles installations électriques dépassant 1 kV dans des zones sensibles (hôpitaux, centres de santé, zones résidentielles, bâtiments touristiques, crèches, écoles, terrains de jeux, parcs publics et aires de loisirs, centres publics comprenant des services et des restaurants).

- **Réglementation de l'urbanisme spécifique aux enfants**

Tenant compte des données épidémiologiques qui suggèrent une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la leucémie infantile, certains pays ont jugé nécessaire de limiter la construction d'installations électriques, comme les lignes électriques ou les stations de transformation, particulièrement dans les zones fréquentées par les enfants pendant un temps long (par exemple les écoles, garderies, parcs de loisirs). Comme décrit précédemment, cette possibilité a été appliquée en limitant la distance des installations aux lignes ou en imposant des valeurs limites d'exposition aux champs magnétiques :

- limitation de la distance :

En Irlande, le gouvernement local n'accorde plus de permis de construire pour de nouvelles installations électriques à côté d'écoles ou de garderies.

Une limite de 0,4 μT est recommandée par L'Autorité de radioprotection et de sûreté nucléaire finnoise (STUK) en Finlande pour les nouvelles installations de lignes

²⁴ Circulaire 1644 (ref 26/94) du 11 mars 1994

électriques et les projets de construction à proximité des lignes électriques existantes dans les locaux où les enfants passent du temps (par exemple les habitations, les écoles et les crèches).

Dans l'état de Californie, il existe des distances minimales à respecter pour la construction d'une école et toute ligne supérieure à 50 kV (par exemple 50-133 kV à 100 pieds ; 220-230 kV à 150 pieds et 500-550 kV à 350 pieds)²⁵.

- valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques

Aux Pays-Bas, le Ministère du logement, de l'aménagement du territoire et de l'environnement a recommandé d'augmenter la distance séparant les nouvelles lignes de transport d'électricité des logements existants et les lignes existantes des nouveaux bâtiments résidentiels, de sorte que l'exposition moyenne annuelle des enfants ne dépasse pas 0,4 µT (dans la mesure du raisonnablement possible). Cependant, aucune modification des installations existantes n'est recommandée²⁶.

- **Réglementation d'urbanisme fournie à titre d'avis général**

Certains pays ont mis en œuvre des mesures de précaution en fournissant des conseils très généraux, permettant des interprétations différentes. Quelques exemples :

- recommandation d'évitement prudent des nouvelles lignes électriques : lors des phases de planification des nouvelles lignes, des options seront proposées afin de choisir celle qui permettra d'exposer le moins d'individus aux niveaux de champs les plus bas possibles. Ce type de recommandation est appliqué dans certains états des États-Unis, comme la Californie, le Colorado, le Connecticut, le Maryland, le New Jersey, Hawaii, l'Ohio et la Pennsylvanie ;
- l'implication du public lors du choix de la localisation des sites pour les installations futures entraîne souvent une meilleure acceptation de la nouvelle construction. Cette solution tient compte des différents intérêts des parties prenantes, et facilite ainsi le processus d'implantation des installations et leur acceptation dans la communauté (par exemple, l'Irlande, l'Italie, les Pays-Bas et le Royaume-Uni) ;
- accord entre l'industrie, le gouvernement et les municipalités locales quant à la localisation des installations. Il s'agit d'une autre forme de participation des différentes parties prenantes, tenant compte des niveaux d'exposition prévus lors de la planification de nouvelles installations (par exemple, les Pays-Bas et le Royaume-Uni).

Tableau 6 : politiques concernant l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences dans différents pays

Politique Nationale	Pays
Absence de réglementation nationale ou fédérale	Arménie, Belgique, Canada, États-Unis, Inde, Kazakhstan, Malaisie, Mongolie, Thaïlande, Ouzbékistan, etc.
Moins stricte que les lignes directrices : Icnirp 1998/2010 et 1999/519/EC pour des durées limitées (heures ou minutes par jour)	Australie, Finlande et Grande-Bretagne.
Icnirp 1998/2010 ; 1999/519/EC – application	Afrique du Sud, Australie, Autriche, Corée du

²⁵ California department of education: Power Line Setback Exemption Guidance. Available at <https://www.cde.ca.gov/ls/fa/sf/powerlinesetback.asp>.

²⁶ State Secretary of Housing Spatial Planning and the Environment of the Netherlands Recommendations with regard to overhead high-voltage power lines, Oct 3, 2005; SAS/2005183118.

volontaire	Sud, Espagne, Finlande, Irlande, Israël, Lettonie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Singapour, Suède, Taïwan et Royaume-Uni.
Icnirp 1998/2010 ; 1999/519/EC - dans le droit national	Allemagne, Bahreïn, Brésil, Chypre, France, Grèce, Hongrie, Italie, Nouvelle-Zélande, Norvège, Pérou, Philippines, Portugal et Suisse.
Plus rigoureux que Icnirp 1998/2010 ; 1999/519/EC	Argentine, Chine, Pologne et Russie.

Tableau 7 : mode d'application du principe de précaution dans ces pays

Principe de précaution	Actions spécifiques	Lignes directrices	Pays/Etats
Limites établies par précaution		Valeur limite	Israël, Italie, Suisse.
<i>Statu quo</i>			Certains états aux États-Unis.
Réduire l'exposition	Conseil d'ordre général		Allemagne.
Réduire l'exposition à coût raisonnable	Conseil d'ordre général		Australie, Nouvelle-Zélande, Norvège, Suède, Royaume-Uni.
	Définition d'un budget		Californie, Israël.
Aménagement	Limiter la construction dans les zones résidentielles	Limites de distance	Israël, Irlande, Luxembourg, Connecticut.
		Valeurs limites de champs	Finlande, France, Slovaquie.
	Limiter les nouvelles installations près des écoles et des garderies	Limites de distance	État de Californie, Finlande, Irlande.
		Valeurs limites de champs	Pays-Bas, France.
Participation du public dans le choix du site		Irlande, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni.	
Application de la politique aux anciennes installations			Israël, Italie, Suisse.
Analyse coût-bénéfice requise			Allemagne, Australie, État de Californie, Grande-Bretagne

4.3 France

4.3.1 Réglementation concernant la population générale

En Europe, les recommandations les plus récentes pour l'exposition du public aux champs électromagnétiques sont celles du Conseil de l'Europe (1999/519/CE), qui recommande aux états membres d'intégrer les niveaux d'exposition définis en 1998 par l'Icnirp dans leur législation nationale. En France, ces recommandations sont définies dans le décret n°2002-775 du 3 mai 2002, qui ne concerne cependant que les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication et les installations radioélectriques (il ne s'applique donc pas aux installations émettant des champs électromagnétiques basses fréquences. À la fréquence du courant électrique utilisé en environnement domestique, 50 Hz, les valeurs limites d'exposition préconisées par la recommandation européenne sont de 100 μ T pour le champ magnétique et de 5 kV/m pour le champ électrique.

Dans son avis du 23 mars 2010, l'Afsset estimait qu'il était justifié, par précaution, de ne plus augmenter le nombre de personnes sensibles exposées autour des lignes de transport d'électricité à très haute tension et de limiter les expositions. Elle précisait que « cette recommandation peut prendre la forme de la création d'une zone d'exclusion de nouvelles constructions d'établissements recevant du public (hôpitaux, école, etc.) qui accueillent des personnes sensibles (femmes enceintes et enfants) d'au minimum de 100 m d'une part et d'autre des lignes de transport d'électricité à très hautes tensions ».

De son côté, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Opecst) a recommandé, en 2010, la création de « zones de prudence » pour les jeunes enfants dans lesquelles l'exposition serait limitée à 0,4 μ T.

Considérant les incertitudes scientifiques qui demeurent sur le risque sanitaire, l'instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité va dans le même sens et demande aux préfets « de recommander aux collectivités territoriales et aux autorités en charge de la délivrance de permis de construire, d'éviter, dans la mesure du possible, de décider ou d'autoriser l'implantation de nouveaux établissements sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, maternelles, écoles primaires etc.) dans les zones qui, situées à proximité d'ouvrages THT, HT, lignes aériennes, câbles souterrains et postes de transformation ou jeux de barres, sont exposées à un champ magnétique de plus de 1 μ T ».

4.3.2 Réglementation concernant la population professionnelle

Les valeurs limites d'exposition professionnelles sont définies en Europe par la Directive 2013/35/UE du 26 juin 2013. La transposition en droit français a été effectuée par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 entré en vigueur le 1^{er} janvier 2017. Ce décret définit les règles de prévention contre les risques pour la santé et la sécurité des travailleurs exposés aux champs électromagnétiques, notamment contre leurs effets biophysiques directs et leurs effets indirects connus. Il vise ainsi à améliorer la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs, qui reposait jusqu'alors sur les seuls principes généraux de prévention, et intègre une approche graduée des moyens de prévention et du dialogue interne à mettre en œuvre en cas de dépassement des « valeurs déclenchant l'action » (VA) et des « valeurs limites d'exposition » (VLE).

Après deux échecs consécutifs pour transposer en droit national une Directive européenne sur l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques, l'élaboration de la Directive 2013/35/UE a été repensée complètement, sur la base de nouvelles données scientifiques fournies par des experts reconnus sur le plan international. Ces travaux ont notamment tenu compte des préoccupations exprimées par certaines parties prenantes quant aux effets éventuels de la mise en œuvre de la précédente directive sur l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques (n°2004/40/CE) pour les activités liées à l'imagerie par résonance

magnétique. Des préoccupations ont également été exprimées quant à l'incidence de cette directive sur certaines activités industrielles. La nouvelle directive instaure des mesures visant à la protection des travailleurs contre les risques aigus liés aux champs électromagnétiques. Elle ne traite pas des effets à long terme, invoquant l'absence actuellement d'éléments scientifiques probants qui permettraient d'établir un lien de causalité avec l'exposition aux champs électromagnétiques. Pour les valeurs limites d'exposition, la Directive s'appuie les travaux de l'Icnirp publiés en 2010 (Icnirp, 2010). Cette directive est destinée à remédier à tous les effets biophysiques directs et indirects connus provoqués par l'exposition aux champs électromagnétiques, afin non seulement de protéger la santé et la sécurité de chaque travailleur pris isolément, mais également de créer pour l'ensemble des travailleurs de l'Union européenne un socle minimal de protection, tout en réduisant les distorsions éventuelles de concurrence.

Afin de protéger les travailleurs exposés aux champs électromagnétiques, la Directive 2013/35/UE impose de réaliser une évaluation des risques efficace. L'employeur doit évaluer tous les risques pour les travailleurs dus aux champs électromagnétiques sur le lieu de travail et, si nécessaire, mesurer ou calculer les niveaux des champs électromagnétiques auxquels les travailleurs sont exposés. Cette obligation devrait cependant être proportionnée à la situation sur le lieu de travail. Le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques peut être réduit plus efficacement par l'introduction de mesures préventives dès le stade de la conception des postes de travail, ainsi qu'en donnant la priorité, lors du choix des équipements, procédés et méthodes de travail, à la réduction des risques à la source. Le Tableau 8 donne les valeurs déclenchant l'action pour une exposition à des champs magnétiques compris entre 1 Hz et 10 MHz.

Tableau 8 : valeurs déclenchant l'action pour une exposition des travailleurs à des champs électriques et magnétiques dont la fréquence est comprise entre 1 Hz et 10 MHz

Fréquences	Effets non thermiques				
	Induction magnétique (B)			Champ électrique E	
	VA (B) basse [μT] (RMS)	VA (B) haute [μT] (RMS)	VA (B) exposition localisée des membres [μT] (RMS)	VA (E) basse [Vm] (RMS)	VA (E) haute [Vm] (RMS)
1 < f < 8 Hz	$2 \cdot 10^5 / f^2$	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	20 000	20 000
8 < f < 25 Hz	$2,5 \cdot 10^4 / f$	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	20 000	20 000
25 < f < 50 Hz	1 000	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	$5 \cdot 10^5 / f$	20 000
50 < f < 300 Hz	1 000	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	$5 \cdot 10^5 / f$	$10^6 / f$
300 < f < 1 640 Hz	$3 \cdot 10^5 / f$	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	$5 \cdot 10^5 / f$	$10^6 / f$
1 640 Hz < f < 3 kHz	$3 \cdot 10^5 / f$	$3 \cdot 10^5 / f$	$9 \cdot 10^5 / f$	$5 \cdot 10^5 / f$	610
3 kHz < f < 10 MHz	100	100	300	170	610

f est la fréquence en Hertz. VA (B) : valeur déclenchant l'action pour l'induction magnétique B. VA (E) : valeur déclenchant l'action pour le champ électrique E. RMS : valeur efficace (source INRS)

5 Caractérisation des expositions

L'objectif de ce chapitre est de décrire l'état actuel des connaissances concernant l'exposition de la population générale et des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences. Une revue des différentes sources d'exposition est ainsi présentée, en les mettant en perspective avec les évolutions technologiques futures qui pourraient impacter la nature et le nombre de ces sources, comme les « réseaux électriques intelligents » (*Smart-Grid*) ou bien les voitures à propulsion électrique. Ce chapitre présente également des données d'exposition obtenues par le biais des mesures de champs magnétiques²⁷ effectuées par le Réseau de transport d'électricité (RTE) à proximité des lignes très haute tension (THT) et haute tension (HT)²⁸ qui permettent, compte tenu du nombre important de mesures effectuées et de la variabilité des situations des lignes, de fournir une estimation des niveaux d'exposition moyens aux champs magnétiques émis par les lignes de transport d'électricité. Ces données sont à analyser à l'aune des résultats de l'étude réalisée pour cette expertise visant à estimer le nombre d'habitants sur le territoire français potentiellement impactés par la présence d'une ligne THT ou HT.

Les notions de physique et d'électromagnétisme utiles à la compréhension des paragraphes qui suivent sont rappelées en annexe 2.

5.1 Méthodes d'évaluation de l'exposition

La caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences constitue un des éléments importants d'évaluation et de gestion du risque sanitaire potentiel. Afin d'estimer l'exposition réelle de la population générale, il est nécessaire d'identifier les paramètres pertinents de cette exposition et de disposer de méthodes adaptées à leur caractérisation. Évaluer l'exposition de la population générale, ou de populations professionnelles spécifiques, consiste à connaître la proportion de la population exposée à une valeur donnée d'un champ électromagnétique, ainsi que la source de cette exposition. Dans ce cadre, les éléments importants sont la durée des mesures, l'influence potentielle de la saison, la reproductibilité dans le temps et la connaissance de l'historique de l'exposition. La grande variabilité de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques dans le temps met l'accent sur l'importance des mesures individuelles prolongées pour une estimation rigoureuse de l'exposition.

L'évaluation de l'exposition aux champs basses fréquences peut être basée sur des méthodes indirectes (calculs analytiques ou simulations électromagnétiques), mais également sur des mesures directes effectuées soit en poste fixe à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, soit en équipant des personnes d'enregistreurs portatifs. L'objectif est de caractériser l'exposition en tenant compte de sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

De plus, il est important de bien choisir les paramètres physiques permettant d'estimer l'exposition selon le type d'étude qui est menée. En effet, de nombreux indicateurs peuvent être utilisés, tels que l'exposition moyenne pondérée (Preston-Martin *et al.* 1996), la moyenne arithmétique, la

²⁷ L'obligation de mesurage de l'exposition au voisinage des lignes de transport d'électricité est précisée dans l'article 26 du Décret n° 2011-1697 du 1er décembre 2011 relatif aux ouvrages des réseaux publics d'électricité et des autres réseaux d'électricité et au dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques. Les conditions techniques de mesure sont précisées dans l'arrêté du 23 avril 2012 portant application de l'article 26 du décret no 2011-1697 du 1er décembre 2011 relatif aux ouvrages des réseaux publics d'électricité et des autres réseaux d'électricité et au dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques.

²⁸ La norme NF C 18-510 définit les domaines de tension suivants en courant alternatif : la très basse tension inférieure à 50 V, la basse tension entre 50 V et 1 000 V et la haute tension au-dessus de 1 000 V. La haute tension A (HTA) concerne les tensions entre 1 000 V et 50 000 V. La haute tension B (HTB) concerne les tensions au-dessus de 50 000 V. Les termes haute tension et très haute tension sont parfois utilisés notamment par RTE, pour désigner les lignes à 63 kV et 90 kV (haute tension) et à 225 kV et 400 kV (très haute tension).

moyenne géométrique²⁹ (MG) ou la médiane des valeurs mesurées (London *et al.* 1991; Vistnes *et al.* 1997). La distribution temporelle de l'exposition aux champs électromagnétiques suivant souvent une distribution lognormale, la moyenne géométrique est communément utilisée (Grellier *et al.*, 2014). Les pics d'exposition peuvent également être mesurés, ainsi que la durée d'exposition au-delà d'un certain niveau de champ ou encore les variations rapides de flux magnétique.

Une première méthode d'estimation de l'exposition appliquée aux lieux d'habitation consiste à classer le lieu en fonction de sa distance à un type particulier de source de transport d'électricité (Kaune et Savitz 1994 ; Wertheimer et Leeper 1979). Cette méthode reste cependant indicative de l'exposition, puisqu'elle ne considère que les champs générés par le système de distribution localisable de l'électricité et ne prend pas en compte les sources à l'intérieur du bâtiment. Elle fait par ailleurs appel à une estimation du niveau de champ électromagnétique en fonction de la distance à la source, ce qui en fait une méthode peu précise pour évaluer l'exposition.

Le champ généré par les lignes électriques peut cependant être calculé si leurs caractéristiques géométriques et les courants qui y circulent sont connus (Feychting et Ahlbom 1993 ; London *et al.* 1991 ; Vistnes *et al.* 1997). Ces publications ont montré la cohérence entre les résultats des calculs et les mesures.

Un autre moyen d'estimation de l'exposition, en tenant compte cette fois-ci du temps d'exposition des sujets, est le calcul du champ 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 niveau moyen du champ calculé par le nombre de mois d'exposition sur l'année. Elle est alors exprimée en μT -année. L'exposition cumulée des sujets aux champs basses fréquences peut être également évaluée par les champs émis par les appareils domestiques (Behrens *et al.*, 2004). Elle est aussi utilisée dans certaines matrices emploi exposition (Turner *et al.*, 2014).

L'exposition peut également être mesurée directement à l'aide de mesures individuelles, en utilisant des magnétomètres portatifs qui permettent de mesurer les champs auxquels les sujets sont exposés (Eskelinen *et al.* 2002 ; McBride *et al.* 1999 ; Schoenfeld *et al.* 1999), généralement sur 24 ou 48 heures. Il est à noter que cette approche, dans les études considérées, prend généralement en compte les champs produits par toutes les sources potentielles sans les distinguer.

5.2 Exposition de la population générale

5.2.1 Sources d'exposition

5.2.1.1 Les lignes de transport et de distribution d'électricité

La source la plus connue de champs électromagnétiques basses fréquences est le réseau de transport et de distribution d'électricité. Ce réseau électrique s'est développé en France depuis plus d'un siècle pour accompagner la généralisation de l'utilisation de l'électricité. Il permet l'acheminement de l'énergie électrique entre les producteurs d'électricité et les consommateurs. On distingue le réseau de transport qui permet l'acheminement de l'énergie sur de longues distances et utilise pour cela des lignes à très haute tension (THT) (400 kV et 225 kV) et à haute

²⁹ La moyenne arithmétique est la somme des valeurs divisée par l'effectif, définie par la formule suivante :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

La moyenne géométrique (MG) d'une série statistique quantitative positive non nulle est définie telle que son logarithme est la moyenne arithmétique des logarithmes des valeurs de la série (antilogarithme de la moyenne des logarithmes de chacune des observations). La base de son calcul est la suivante :

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}.$$

Elle est plus robuste que la moyenne arithmétique aux valeurs extrêmes.

tension (HT) (90 kV ; 63 kV), et le réseau de distribution qui permet d'alimenter directement les clients et utilise des lignes à moyenne et basse tension (20 kV et 230 V)³⁰.

Le réseau est actuellement composé de 100 000 kilomètres de lignes aériennes (en comptant le nombre de circuits), 5 000 kilomètres de câbles souterrains, 2 710 postes et 50 liaisons transfrontalières (cf. audition de RTE).

L'intensité des champs électromagnétiques créés par les lignes de transport d'électricité dépend de la configuration de ces lignes (enterrées ou aériennes), de leur écartement, ou encore des courants portés qui varient en intensité et en périodicité en fonction de la courbe de charge de la ligne. Le champ magnétique généré par une ligne enterrée est généralement moins élevé qu'un équivalent hors-sol, mais, à la surface du sol, à l'aplomb de la ligne souterraine, le champ peut être plus élevé. En effet, les lignes souterraines étant isolées électriquement par une gaine, elles sont le plus souvent rassemblées en faisceau, ce qui limite leur emprise au sol, mais peut créer, à l'aplomb, un renforcement du champ magnétique. L'influence du champ magnétique est en revanche plus rapidement atténuée que dans le cas des lignes aériennes, non gainées, pour lesquelles un espacement important est requis afin d'assurer l'isolation électrique par l'air ambiant. RTE disposant d'un droit d'occupation légal des routes nationales, communales et des trottoirs, en milieu urbain, les lignes souterraines ne sont pas situées sous les habitations, mais sous les routes et les trottoirs.

La courbe de charge a une allure différente selon qu'on a affaire à une ligne d'évacuation de centrale nucléaire (courbe de charge pratiquement constante dans le temps) où la production électrique est relativement constante, ou à une ligne d'évacuation de barrage hydraulique pour laquelle la courbe est hachée avec des valeurs très faibles la plupart du temps et quelques pics lorsque la production électrique du barrage fonctionne.

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 et inversement proportionnel au carré de la distance aux câbles. Les valeurs les plus importantes sont produites par les lignes 400 kV, à quelques mètres de l'aplomb de la ligne (cf. Figure 4) mais décroissent rapidement en fonction de la distance pour se situer autour de 1 µT à une distance d'une centaine de mètres.

³⁰ Selon Enedis, les valeurs standards pour les dispositifs raccordés en « basse tension » sur le réseau Enedis correspondent à 230 V pour la tension simple (monophasée) et 400 V pour la tension composée (triphasee).

La « haute tension A » ou HTA (dite aussi « moyenne tension ») peut être comprise entre 1 kV et 50 kV.

Selon RTE, Les domaines de tension des réseaux publics de transport et de distribution sont définis conformément aux règles tarifaires pour l'utilisation des réseaux publics de transport et de distribution d'électricité, par le tableau ci-dessous :

Tension de raccordement (U)	Domaine de Tension	
$U \leq 1 \text{ kV}$	BT	
$1 \text{ kV} < U \leq 40 \text{ kV}$	HTA 1	Domaines HTA
$40 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$	HTA 2	
$50 \text{ kV} < U \leq 130 \text{ kV}$	HTB 1	
$130 \text{ kV} < U \leq 350 \text{ kV}$	HTB 2	Domaines HTB
$350 \text{ kV} < U \leq 500 \text{ kV}$	HTB 3	

Le domaine HTB 1 est usuellement appelé « haute tension », alors que les domaines HTB 2 et HTB 3, correspondant aux lignes 225 kV et 400 kV, sont fréquemment désignés sous l'appellation « très haute tension ».

Dans la même configuration (ligne à 400 kV), le champ électrique varie de 5 kV/m sous la ligne à 200 V/m à 100 m.

Si l'ensemble des lignes présentent une courbe de décroissance de cette forme, la valeur du champ magnétique est variable selon les conditions d'exploitation de la ligne (régime d'exploitation : courbes bleue et verte) et selon l'emplacement par rapport à la ligne.

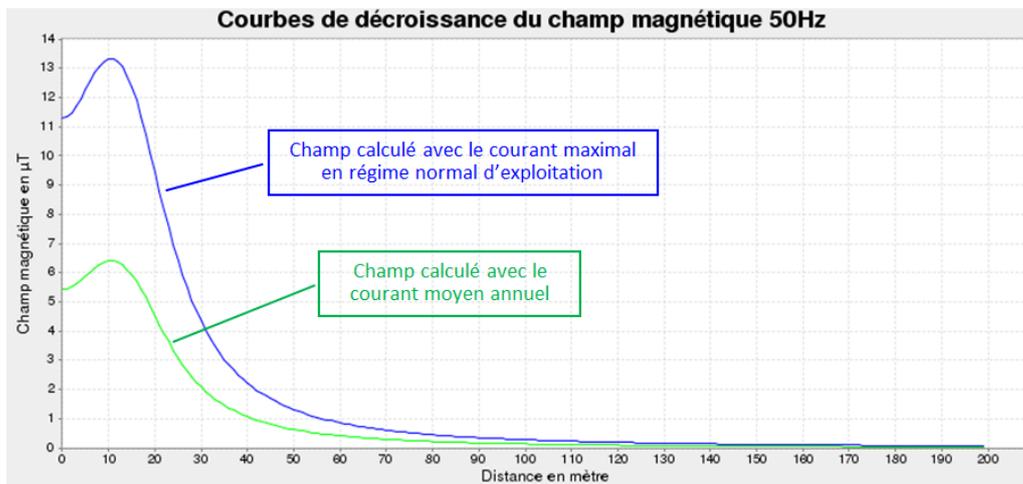


Figure 4 : calcul du champ magnétique émis par une liaison aérienne (1 m au-dessus du sol, ligne 400 kV, calcul sur un demi-axe perpendiculaire à la ligne, en creux de portée entre deux pylônes)

La valeur du champ magnétique est plus élevée en milieu de portée (entre deux pylônes) car les conducteurs sont plus proches du sol (environ à 12 à 15 m de hauteur sur terrain plat) qu'au niveau du pylône (généralement à 30 à 40 m de hauteur) (cf. Figure 5). Selon les conditions atmosphériques (température notamment) et l'intensité du courant circulant dans les câbles, la valeur du champ magnétique peut également varier, en raison de la flèche des câbles liée à leur température, qui peuvent donc être plus ou moins éloignés du sol.

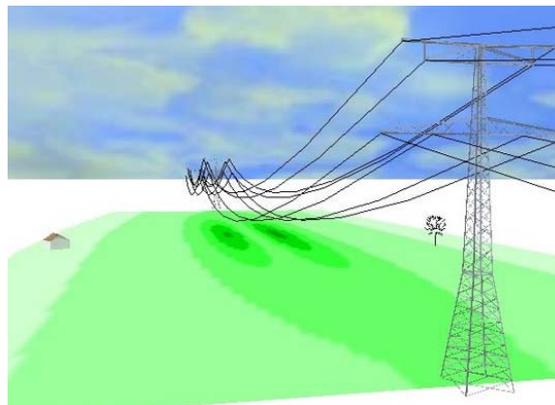


Figure 5 : vue 3D d'un calcul de champ magnétique sous une ligne 400 kV

Concernant les lignes souterraines, le pic du champ magnétique est généralement plus élevé à la proximité immédiate de la ligne (< 20m). La décroissance est plus marquée que pour une ligne aérienne.

5.2.1.2 Transformateurs électriques

Les transformateurs électriques sont utilisés principalement dans les sous-stations pour élever la tension (avant le transport d'électricité) ou la diminuer (avant la distribution). On les retrouve également dans les sites industriels ou, de plus en plus, dans les immeubles d'habitation.

En France, plusieurs centaines de milliers de transformateurs se trouvent dans les postes de distribution moyenne et basse tension de 20 kV / 220 V. Le champ magnétique 50 Hz peut

atteindre quelques μT à plusieurs dizaines de μT en particulier près des câbles LV (*low voltage*), dépendant de l'épaisseur des murs mitoyens, mais également en fonction de la puissance du poste variant de façon importante selon le nombre de clients alimentés.

L'utilisation d'écrans et de matériaux adaptés lors de la construction des transformateurs permet de limiter au maximum les fuites magnétiques. La majorité des fuites résiduelles est située en entrée/sortie des câbles des transformateurs. À cet endroit, les valeurs de champ magnétique peuvent varier de 20 à 30 μT . En revanche, le champ électrique dans les postes de transformation reste faible, de l'ordre de quelques dizaines de volts par mètre (*cf.* 5.2.2.3).

5.2.1.3 Les sources en environnement résidentiel

L'exposition domestique aux basses fréquences est provoquée par tous les appareils qui se branchent sur le secteur et qui génèrent des champs magnétiques plus ou moins importants selon leur puissance électrique, la technologie utilisée ou le mode d'utilisation. De ce fait, elle est importante : on estime qu'un tiers de l'exposition individuelle au champ magnétique pourrait être attribuée à l'utilisation d'appareils électroménagers (Gajsek *et al.*, 2016). Les niveaux d'exposition maximum dans la gamme des basses fréquences surviennent lors de l'utilisation d'appareils au contact ou à proximité du corps, comme par exemple un rasoir électrique ou un sèche-cheveux.

5.2.1.4 Transports : voiture, trains, etc.

Les moyens de transport, tels que les trains et trams alimentés par des lignes électriques, constituent des sources de champs électromagnétiques basses fréquences. Récemment, des interrogations ont émergé sur l'exposition liée aux véhicules à moteur électrique, thermique et hybride.

Relativement peu d'études ont été conduites sur les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences dans et à proximité des moyens de transport tels que les trains, trams, véhicules à moteurs thermiques, hybrides ou électriques (*cf.* 5.2.2.4). Les champs magnétiques provenant des moyens de transport sont non-sinusoïdaux et varient constamment. Ils peuvent donc se situer dans une large gamme de fréquences, de quelques Hz jusqu'au-delà des basses fréquences.

Les véhicules électriques et hybrides s'imposent de plus en plus comme une alternative aux véhicules à moteurs thermiques. Leur développement est lié notamment aux progrès importants réalisés ces dernières années dans le domaine des batteries à forte capacité et des technologies à base d'hydrogène comme la pile à combustible. Les auditions, par le groupe de travail, de constructeurs automobiles (Renault, PSA) ont indiqué que le travail de caractérisation des champs électromagnétiques basses fréquences dans les véhicules est relativement récent. Il n'existe pas encore de convergence des approches en matière de méthodes normatives représentatives des situations de conduite réelles pour évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques émis, ni de consensus sur l'origine des sources les plus émettrices de champ basse fréquence dans les véhicules. Les sources d'émission de champs magnétiques basses fréquences, selon les constructeurs auditionnés, sont les suivantes :

- les câbles de puissance, en particuliers ceux issus de la batterie du véhicule. De plus, dans certains véhicules, la batterie est située à l'arrière de la voiture, tandis que le moteur est situé à l'avant. Les flux de courant électrique entre ces deux points transitant par des câbles situés sous le plancher de la voiture sont responsables de l'émission de champs électromagnétiques ;
- tous les éléments électroniques de puissance, tels que les moteurs électriques, l'alternateur, les pompes, les micromoteurs de la ventilation et de la climatisation, etc. ;
- les renforcements métalliques des pneus de voitures, qui peuvent se magnétiser (processus de fabrication, effet du champ magnétique terrestre), ce qui a pour effet de transformer les pneus en aimants multi-pôles. Lorsque la voiture roule, la rotation des roues génère ainsi un champ électromagnétique basse fréquence, variable en fonction de la vitesse ;

- dans les voitures hybrides ou électriques, s'ajoute toute la chaîne de traction hybride ou électrique. Au démarrage et lors de la conduite à basse vitesse, le véhicule est alimenté uniquement par le moteur électrique. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, le système passe du moteur électrique au moteur à essence. À des vitesses plus élevées, le moteur à essence entraîne non seulement les roues avant, mais dirige également le courant vers le générateur. Ce courant de charge est également source de champs basses fréquences.

En principe, le système utilise du courant continu (DC), mais du fait du courant non parfaitement redressé ainsi que des variations de la charge du moteur, un champ magnétique basse fréquence peut être produit. Les systèmes de propulsion des moteurs électriques et hybrides utilisent des tensions et des courants électriques beaucoup plus élevés que ceux des véhicules à essence. Les voitures hybrides modernes utilisent des technologies améliorant l'efficacité énergétique, telles que le système de récupération d'énergie au freinage, qui convertit l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique pour recharger la batterie (généralement située sous le siège arrière). Ces éléments peuvent avoir des conséquences sur les niveaux d'exposition (cf. 5.2.2.4).

5.2.2 Synthèse bibliographique sur l'exposition de la population

La population générale est exposée à un nombre croissant de sources de champs électromagnétiques, provenant d'équipements, d'applications et de technologies variées (lignes à haute tension, transformateurs, appareils électroménagers et leur alimentation électrique, ...). La fréquence utilisée majoritairement en Europe est de 50 Hz, alors qu'aux États-Unis et dans d'autres pays, la fréquence du courant est de 60 Hz. Les études ci-dessous se sont intéressées à l'exposition aux champs électromagnétiques dans ce domaine de fréquences. Une autre fréquence importante dans le domaine des basses fréquences est le 16,7 Hz, qui est la fréquence d'alimentation des trains électriques dans certains pays d'Europe comme en Allemagne, et qui doit par conséquent être prise en compte dans l'évaluation de l'exposition du public.

5.2.2.1 Exposition à l'extérieur des bâtiments

Concernant l'évaluation de l'exposition environnementale en Europe et dans le monde, il existe quelques grandes études publiées depuis 2010, qui sont majoritairement liées à des études épidémiologiques investiguant le lien avec la leucémie infantile.

Des mesures ponctuelles ont été réalisées en Espagne, dans une petite ville de 5 000 habitants, en extérieur, sur les trottoirs à 1 m du sol et à un 1 m d'un immeuble. Tous les points de mesures donnaient des résultats inférieurs à 5,33 μT , et la médiane était de 0,18 μT . Le pourcentage de points de mesures supérieures à 0,3 et 0,4 μT était de 27 % et 16,5% respectivement. La loi de distribution du champ magnétique suit une loi lognormale, avec une moyenne de 0,27 μT ($\pm 0,06 \mu\text{T}$), et une médiane et moyenne géométrique de 0,18 ($\pm 0,04$) μT chacune (Paniagua *et al.*, 2015). Ces données sont concordantes avec celles obtenues dans les études antérieures de la même équipe qui rapportaient une moyenne de densité de champ magnétique variant de 0,2 μT à 7 μT (Paniagua *et al.*, 2004, 2007).

Ces résultats sont également en accord avec les données publiées au cours des dernières décennies en Italie, Royaume-Uni, Norvège, Suisse et Allemagne (Bottura *et al.*, 2009, D'Amore *et al.*, 2001, Straume *et al.*, 2008, Joseph *et al.*, 2008). Selon les résultats de ces études, l'exposition de la population générale dans un environnement urbain se situe entre 0,05 μT et 0,2 μT . Des expositions plus élevées peuvent survenir à proximité immédiate de certaines lignes ou de postes de transformation.

5.2.2.2 Exposition liée aux transformateurs intérieurs

La population générale peut être exposée aux champs électromagnétiques émis par les transformateurs dans les immeubles résidentiels, les bureaux ou dans les centres commerciaux. Les champs magnétiques sont principalement générés par le passage du courant électrique dans les câbles qui arrivent (moyenne tension) au transformateur, et dans les câbles (basse tension) qui en repartent.

Dans les dernières études réalisées en Suisse (Röösli *et al.*, 2011) et aux Pays-Bas (Huss *et al.*, 2013), un gradient d'exposition proportionnel à la distance entre un appartement et un local de transformation a été observé dans les appartements des immeubles résidentiels. Trois catégories d'exposition ont été définies : niveau d'exposition élevé, moyen et faible. Pour chacune de ces catégories, les niveaux moyens de champ magnétique sont :

- 0,42 μT dans les pièces contiguës au local du transformateur (niveau élevé) ;
- 0,11 - 0,14 μT dans les pièces partiellement adjacentes au local du transformateur (niveau moyen) ;
- 0,06 - 0,1 μT pour les autres (niveau faible).

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus lors d'études antérieures (Ilonen *et al.*, 2008, Szabo *et al.*, 2007, Thuroczy *et al.*, 2008, Hareuveny *et al.*, 2010). Les auteurs concluent que la classification basée sur la localisation de l'appartement par rapport au local du transformateur semble cohérente et pourrait être utilisée comme indicateur d'exposition dans de futures études épidémiologiques. À noter que l'Anses finance une étude visant à caractériser l'exposition à proximité des locaux de transformation dans des immeubles collectifs. Les résultats devraient être disponibles en 2019.

Les études d'Yitzhak *et al.*, 2012 et de Kandel *et al.*, 2013, réalisées en Israël, ont montré que seuls les appartements situés juste au-dessus du local du transformateur (de façon totalement ou partiellement contiguë) peuvent être considérés comme exposés aux champs magnétiques. Une corrélation temporelle a été observée entre les champs magnétiques dans ces appartements et les courants électriques des transformateurs. Une corrélation significative ($r = 0,90$) a été observée entre le niveau moyen de champ magnétique dans les appartements situés au-dessus du local du transformateur et l'intensité moyenne du courant transitant par le transformateur. Cette forte corrélation temporelle peut être utilisée pour estimer sur 24 heures le niveau de champ magnétique moyen à partir de mesures ponctuelles. De plus, un champ magnétique de plus de 0,4 μT est rarement observé à plus de 3 mètres des câbles basse tension des transformateurs.

5.2.2.3 Exposition à l'intérieur des bâtiments

Ces dernières décennies, des études d'évaluation de l'exposition ont été réalisées en France, Autriche, Italie, République tchèque, Espagne, Serbie, Australie et Suisse.

En France, l'évaluation de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences a été évaluée dans la ville de Champlan, où transitent des lignes à haute tension dans l'ouest de la ville (Merckel, *et al.*, 2009). L'exposition individuelle de 17 résidents a été mesurée pendant une période de 24 heures. L'exposition moyenne pendant 24 heures de résidents vivant à moins de 100 m de la ligne à haute tension était comprise entre 0,06 μT et 2 μT , en fonction de la distance de la ligne et de leur mode de vie. Cette étude avait montré la possibilité de mesurer précisément l'exposition individuelle et de tracer les expositions intenses et brèves, comme par exemple celles issues de l'utilisation d'appareils électroménagers, mais aussi l'exposition de certaines lignes à haute tension, qui varie quotidiennement en fonction de la demande en électricité.

En Autriche, une étude a analysé les émissions produites par plus de 1 000 appareils électriques (Tomisch *et al.*, 2010, 2012). Cette étude a montré que les émissions à fréquence unique (50 Hz) sont rares, par contre des spectres de fréquences complexes de 5 Hz à 2 kHz sont fréquemment observés, notamment pour les appareils équipés de commandes électroniques de puissance et/ou de moteurs électriques. Dans plus de 2 % des foyers, le niveau moyen de champ magnétique sur 24 heures est supérieur à 0,1 μT . Les appareils munis d'un transformateur sont quant à eux les principales sources de champ magnétique avec un maximum de 1,03 μT au chevet du lit (valeur maximale, distance non précisée).

En 2011, une campagne de mesures basée sur des mesures individuelles a été menée en Italie, prenant en compte l'exposition environnementale et professionnelle (Gobba, 2011). L'objectif de cette étude était de fournir une évaluation de l'exposition au champ magnétique de 543 travailleurs pendant 2 jours. La campagne de mesure a été conduite en situation professionnelle, mais également au domicile et à l'extérieur de l'habitation, fournissant des niveaux médians d'exposition

(5^{ème} et 95^{ème} percentiles) respectivement de 0,14 μT (0,01 μT – 0,24 μT), 0,03 μT (0,02 μT – 0,28 μT) et 0,05 μT (0,04 μT – 2,5 μT).

L'évaluation de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques basses fréquences en République tchèque a été réalisée dans 163 appartements de logements familiaux situés dans des tours d'habitation (Jirik *et al.*, 2011). Les types de logements ont été divisés en trois catégories : (i) logements de grande hauteur (de plus de 4 étages, comprenant plusieurs dizaines de logements) ; (ii) logements multifamiliaux (jusqu'à 4 étages, avec un nombre d'appartements plus faible) ; (iii) logements familiaux (maisons de un à deux étages, avec un ou deux appartements). Pour ces 3 classes de logements, les moyennes géométriques du champ magnétique sont de 0,236 μT , 0,203 μT et 0,072 μT , respectivement. La moyenne pour l'ensemble des logements était de 0,193 μT .

Dans une étude réalisée en Espagne, un protocole de mesure a été introduit pour évaluer l'exposition à des champs basses fréquences dans une école primaire (Alonso *et al.*, 2012). Les niveaux de champ magnétique mesurés s'échelonnaient entre 0,01 et 0,08 μT avec une valeur moyenne de 0,038 μT , alors que les niveaux de champ électrique mesurés se situent entre 0,1 et 47 V/m avec une valeur moyenne de 5,37 V/m.

Une campagne de mesure de champ magnétique a été conduite dans différents lieux d'une ville à l'est de la Serbie, évaluant les champs électromagnétiques basses fréquences émis par des appareils électroménagers et des postes de transformation à proximité de zones résidentielles (Maluckov, 2014). Dans le cas où les appareils électriques étaient débranchés dans l'appartement, le niveau de champ magnétique était compris dans l'intervalle 0,01 – 0,05 μT . Si les appareils étaient branchés sur le secteur, le niveau de champ magnétique était équivalent, sauf à proximité immédiate de l'appareil.

S'intéressant au risque attribuable de l'exposition au champ électromagnétique sur la survenue de la leucémie infantile (voir chapitre 6.1), une étude a présenté les distributions de l'exposition basées sur une revue systématique de la littérature scientifique (Grellier, 2014). L'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences de la population générale dans les 14 études européennes incluses dans cette revue suivait une loi log-normale avec une médiane de 0,02 μT et une déviation standard de 0,06 μT . Selon cette revue, 0,54 % de la population est exposée à plus de 0,3 μT , ce qui est inférieur aux estimations précédentes qui se situaient entre 1,2 et 10,7 %.

Une étude sur le champ magnétique à la fréquence du courant électrique résidentiel a été conduite dans 296 foyers choisis aléatoirement à Melbourne, en Australie (Karipidis, 2015). Les champs magnétiques ont été mesurés de façon ponctuelle à travers le logement, et une mesure des champs électromagnétiques en continu pendant 24 heures a été réalisée dans les pièces où les enfants passent beaucoup de temps. L'exposition moyenne des enfants au champ magnétique était de 0,05 – 0,06 μT . Une exposition prolongée de plus de 0,4 μT a été mise en évidence dans environ 2 % des logements, liée à la proximité immédiate de la maison avec des lignes à haute tension.

Dans le cadre du projet européen FP7 Arimmora, des campagnes de mesures individuelles ont été menées en Italie et en Suisse afin de mieux décrire l'exposition quotidienne des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (Struchen *et al.*, 2015). Dans ces deux pays, 172 enfants âgés de 5 et 13 ans ont été équipés pendant 48 heures d'un dosimètre pour enregistrer l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences pendant leurs activités. Ces mesures ont été reproduites en été et en hiver. De plus, des mesures sur 24 heures ont été réalisées dans la chambre de l'enfant. Afin de maximiser les situations d'exposition, les enfants vivant ou fréquentant une école à moins de 200 mètres d'une ligne à haute tension de plus de 132 kV, à moins de 50 m d'une ligne souterraine ou dans un immeuble hébergeant un transformateur électrique, ont été sur-échantillonnés. La moyenne géométrique de l'exposition individuelle était de 0,04 μT et celle de l'exposition dans les chambres de 0,05 μT . Les enfants qui habitent ou fréquentent une école située à moins de 100 m d'une ligne à haute tension de plus de 132 kV sont en moyenne 3,5 fois plus exposés que les autres, mais leur exposition est assez modérée, avec une moyenne autour de 0,15 μT . Les enfants vivant à moins de 100 m d'une ligne

THT ont une exposition dans leur chambre en moyenne 6,8 fois plus élevée que ceux vivant à plus de 100 m.

Une large étude d'estimation de l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques émis par le courant électrique à 50 Hz a été conduite en France (Magne, *et al.*, 2016). Les données d'exposition de 1 000 enfants (0 – 14 ans) et 1 000 adultes, issues de campagnes de mesures conduites entre 2007 et 2009, ont été collectées. Les moyennes arithmétique et géométrique étaient de 0,09 μT et 0,02 μT respectivement pour les enfants, et 0,14 μT et 0,03 μT respectivement pour les adultes. Rappelons que cette publication concerne l'étude Expers dont la méthodologie avait été analysée dans le rapport de l'Anses publié en 2010, et dont la non représentativité de l'échantillon avait été soulignée.

L'analyse des publications montre l'importance de la proximité des lignes très haute- et haute-tension (THT et HT) sur le niveau d'exposition de la population générale. C'est pourquoi le groupe de travail a souhaité réaliser deux études originales, afin de produire des données nouvelles et de pouvoir vérifier la fiabilité des chiffres avancés dans la littérature. Dans un premier temps, les mesures de champs effectuées à proximité des lignes THT et HT ont été analysées. Ensuite, une étude originale a été menée permettant d'estimer, à l'échelle du territoire français, le nombre d'habitants potentiellement impactés par la présence d'une ligne THT ou HT (*cf.* 5.2.5).

Les études menées à l'extérieur dans les espaces publics en milieu urbain montrent que l'intensité des champs magnétiques basse fréquence varie entre 0,05 et 0,2 μT , mais des valeurs plus fortes (de l'ordre de deux microteslas) peuvent être observées directement en dessous des lignes électriques à haute tension, à proximité immédiate des locaux des transformateurs et des sous-stations. Les niveaux d'exposition de ces installations sont variables dans le temps et dans l'espace.

Dans l'environnement intérieur, des valeurs élevées de champs sont produites par plusieurs appareils domestiques (jusqu'au militesla), dont certains sont utilisés très près du corps, comme par exemple les sèche-cheveux ou les rasoirs électriques. Cependant, l'exposition à ces appareils est très courte et très localisée.

5.2.2.4 Exposition liée aux transports

Transport ferroviaire

Selon l'OMS, un pic de champ magnétique de plus de quelques dizaines de microteslas a été enregistré sur le quai d'une ligne ferroviaire (OMS 2007). Dans le train, le niveau d'exposition des passagers est d'environ 3 – 8 μT (plus de 100 μT dans la cabine) et il peut atteindre 6 - 7 μT sur le quai, avec un pic lors du passage du train. Dans les tramways, le niveau d'exposition d'un passager est entre 0,01 et 5,5 μT , et d'environ 3,5 μT sur le quai, avec un pic lors du passage du tramway (Halgamuge *et al.*, 2010). Les niveaux maximums de champ magnétique sont émis à des fréquences de 50 Hz dans les trams, 15,25 – 16,50 Hz dans les trains et 12 Hz dans les voitures hybrides (Halgamuge *et al.*, 2010).

Véhicules automobiles

L'Office fédéral suisse pour la santé publique a commandité une étude pour mesurer les champs magnétiques émis par les pneus de voiture. Lors de cette étude, des mesures ont été réalisées à une vitesse de 80 km/h. Bien que la fréquence fondamentale à 80 km/h soit de 10 – 12 Hz, les champs magnétiques ont été mesurés à des fréquences de 5 Hz à 2 kHz dans 12 voitures différentes, afin de prendre en compte les harmoniques. Les valeurs les plus élevées sont retrouvées au niveau des pieds des passagers, du siège passager et de la banquette arrière. Dans 33 % des voitures, les niveaux de champs magnétiques sont supérieurs à 2 μT , et supérieurs à 6 μT pour 25 % des cas.

Le niveau de champ magnétique a été mesuré au niveau des quatre sièges, à trois différentes hauteurs (pieds, poitrine et tête) dans deux voitures hybrides (Karabetos *et al.*, 2010, 2014). Etant donné que les niveaux de champ magnétique changent constamment lorsque la voiture se déplace, les mesures ont été réalisées lors de quatre modes de conduites : à l'arrêt mais moteur

en marche, à une vitesse de 30 – 40 km/h, à une vitesse de 80 – 100 km/h et à une vitesse supérieure. Les niveaux de champs ont été caractérisés dans une gamme de fréquence allant de 0 à 32 kHz. Les champs magnétiques à l'arrêt varient de 0,12 μT (au niveau de la tête du conducteur) jusqu'à 1,46 μT (au pied du siège arrière droit). À des vitesses de 30 – 40 km/h, lorsque le moteur électrique alimente principalement le véhicule et que le moteur thermique participe seulement aux phases d'accélération, les niveaux de champ magnétiques sont légèrement supérieurs (0,2 - 1,71 μT). À des vitesses de 80 – 100 km/h, lorsque les moteurs électrique et thermique sont en fonctionnement, les champs magnétiques sont à peine plus élevés (0,23 - 1,73 μT) que dans les cas précédents, en raison de la charge et de la décharge de la batterie. À une vitesse plus élevée, lors de laquelle le véhicule n'utilise que son moteur thermique, le moteur électrique est désactivé et la batterie est en chargement. Les valeurs mesurées sont équivalentes ou inférieures aux niveaux obtenus à 80 – 100 km/h, selon la marque du véhicule.

Tous ces résultats montrent que l'exposition moyenne aux champs magnétiques est en-dessous des valeurs limites d'exposition recommandées par l'Incirp pour le public. Les valeurs les plus élevées, qui atteignent de façon instantanée 78,8 % des valeurs de références de l'Incirp, ont été mesurées au niveau des pieds du siège passager, pendant le freinage et l'accélération, à une vitesse autour de 90 km/h.

Tell *et al.* (2013, 2016) ont mené une étude pilote pour mesurer les niveaux de champs dans 14 véhicules : six véhicules essences (dont 2 camions) et six véhicules hybrides (dont un camion) et 2 véhicules électriques. Pour trois véhicules essences et un véhicule hybride, des comparaisons entre différentes générations du même modèle ont été effectuées. Les mesures ont été réalisées sur circuits pour s'affranchir des expositions externes. Les mesures ont été réalisées en plaçant un enregistreur Emdex sur chaque siège et sur le plancher arrière de la voiture. La moyenne géométrique des niveaux de champs pour les véhicules hybrides était de 0,095 μT , tandis qu'elle était de 0,051 μT dans les véhicules à essence. En comparant les niveaux de champs entre les véhicules hybrides et à essence du même modèle, les niveaux d'exposition sont légèrement plus élevés dans les véhicules hybrides.

Ruddle *et al.* (2013) ont réalisé des mesures et des simulations de l'exposition aux champs magnétiques dans des petits véhicules électriques. Les mesures du champ magnétique ont été effectuées lors de phases d'accélération ou de ralentissement, et à des fréquences supérieures au kHz (cette étude s'inscrit dans le cadre de projet de recherche européen FP7 *EMF safety*). La forme d'onde du champ magnétique observée au voisinage du plancher du véhicule est en corrélation avec les formes d'onde mesurées sur les câbles d'alimentation haute tension reliés aux convertisseurs. Les résultats indiquent que l'exposition instantanée pire-cas est inférieure à 20 % des niveaux de référence de l'UE et inférieure à 5 % des niveaux de référence de l'Incirp 2010 pour l'exposition du public.

Ptitsyna *et al.* (2014) ont réalisé une revue consacrée à l'exposition aux champs magnétiques émis par les voitures électriques. Selon leur analyse, les voitures électriques produisent un champ magnétique dont la gamme de fréquences est large, allant de quelques Hz au kHz. Les nouvelles voitures hybrides produiraient des champs magnétiques d'intensité plus élevée que les voitures à diesel ou à essence. La fréquence fondamentale des voitures électriques est de 10 – 12 Hz à une vitesse de 80 km/h. La rotation des pneus comprenant des inclusions de fibres métalliques génère des champs magnétiques de fréquences souvent inférieures à 20 Hz. Le champ magnétique ne dépasse pas 2 μT . Les niveaux de champs magnétiques dans les voitures électriques sont comparables à ceux rencontrés en environnement résidentiel. Le champ magnétique des véhicules électriques est caractérisé par une combinaison de composantes statiques et variables en fonction du temps, jusqu'à quelques kHz et plus, des formes d'onde non sinusoïdales, une exposition intermittente avec une grande variabilité dans le temps et l'espace. La fréquence et l'intensité des champs changent continuellement en fonction des caractéristiques du mouvement (plage de vitesse, accélération, freinage, rotation, etc.). Dans certaines études, il a été constaté que dans les voitures hybrides, le pic d'intensité de champ magnétique se situe à une fréquence de 12 Hz.

Le champ magnétique à l'intérieur de huit véhicules électriques différents, dont le moteur utilise des technologies différentes, a été mesuré à des fréquences allant jusqu'à 10 MHz (Vassilev *et al.*, 2015). Des mesures ont été effectuées sur route, ce qui impliquait une conduite avec une accélération et une décélération maximales. Trois véhicules avec moteurs thermiques conventionnels ont également été étudiés à des fins de comparaison. Les résultats ont montré que l'exposition a atteint 20 % du niveau de référence de l'Incirp 2010 pour l'exposition du public près de la batterie et à proximité des pieds pendant le démarrage du véhicule, mais était inférieur à 2 % au niveau de la tête du passager avant. Des expositions maximales de l'ordre de 10 % des niveaux de référence Incirp 2010 ont été obtenues pour les voitures à moteur thermique classique. En ce qui concerne l'aimantation permanente de l'acier des pneumatiques, les mesures montrent que ce phénomène est responsable d'un champ magnétique à l'intérieur de la voiture s'élevant jusqu'à 2 μT pour des fréquences de rotation des roues de 0 à 20 Hz, correspondant à des vitesses allant de 0 à 130 km/h. Le champ magnétique dû aux courants de traction présente également une grande variabilité spatiale. Dans les véhicules électriques, il se caractérise généralement par une fréquence de commutation d'environ 10 kHz. Dans cette plage de fréquence intermédiaire (inférieure à 200 kHz), le niveau de champ était inférieur à 0,02 μT . Les valeurs maximales de champ magnétique ont été observées pour des fréquences se situant autour de 7-9 kHz.

Hareuveny *et al.* ont publié en 2015 une étude dans laquelle les niveaux de champs magnétiques ont été mesurés dans 9 voitures (3 à moteur diesel, 4 à moteur essence et 2 à moteur hybride) dans une gamme de fréquence de 40 à 800 Hz. En moyennant les niveaux mesurés au niveau des quatre sièges sous différents scénarios de conduite, les champs étaient les plus faibles dans les voitures diesel (0,02 μT), plus élevés pour l'essence (0,04 - 0,05 μT) et encore plus élevés dans les hybrides (0,06 - 0,09 μT). Les voitures hybrides avaient une proportion plus importante de mesures supérieures à 0,2 μT . Les niveaux d'exposition étaient également plus élevés en mouvement par rapport à l'arrêt ou au ralenti (2 500 tr/min) et plus encore à 80 km/h par rapport à 40 km/h. Dans les voitures hybrides, les niveaux de champs augmentent proportionnellement avec la vitesse. Les champs magnétiques étaient également plus élevés au niveau des sièges arrière dans ces véhicules. Les champs maximaux dans l'ensemble des dix voitures étaient toujours à proximité du sol. Les champs magnétiques générés par la rotation des pneus n'ont pas été enregistrés. La comparaison de ces résultats avec les niveaux d'exposition moyens au champ magnétique dans un lit ($MG^{31} = 0,052 \mu\text{T}$), au domicile hors du lit ($MG = 0,080 \mu\text{T}$) et en voyage ($MG = 0,096 \mu\text{T}$) montrent une exposition légèrement plus élevée liée aux véhicules à moteur, mais inférieure à la moyenne pondérée dans le temps pour les conducteurs professionnels ($MG = 0,12 \mu\text{T}$).

Paniagua *et al.* (2017) ont mené une analyse spectrale des champs magnétiques basses fréquences dans les voitures à moteur thermique, pour identifier leurs fréquences et évaluer l'exposition selon les lignes directrices de l'Incirp. Les résultats indiquent que la principale émission de champs magnétique a été détectée dans la gamme de 5 – 100 Hz, correspondant à la fréquence de rotation des roues et à ses harmoniques. Les auteurs affirment donc que la source majoritaire des champs magnétiques basses fréquences émis par les voitures est la rotation des roues et que les autres sources sont négligeables. Les quotients d'exposition³² augmentent avec la vitesse. Les niveaux de champs magnétiques sont plus bas que les valeurs de références (3 % des valeurs recommandées par l'Incirp), mais supérieurs à 0,3 μT . Les valeurs des champs magnétiques s'échelonnent entre 0,33 et 2,05 μT . À 90 km/h, les niveaux de champ magnétique sont compris entre 0,34 et 1,50 μT (moyenne 0,94 μT , médiane 0,77 μT). La fréquence de l'émission de champs liés à la rotation des roues est corrélée avec la vitesse du véhicule, et est comprise entre 8 et 16 Hz pour une vitesse comprise entre 60 et 120 km/h, respectivement.

³¹ MG : moyenne géométrique.

³² Le quotient d'exposition est défini comme la valeur mesurée de champ magnétique divisée par la valeur limite d'exposition à la fréquence donnée.

L'exposition à l'intérieur de la voiture n'est pas homogène, les niveaux de champs magnétiques sont plus élevés au niveau des pieds qu'au niveau de la tête.

5.2.3 Données issues du rapport du CSTB « Quantification de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'intérieur des bâtiments »

En 2011, l'Anses a commandité, auprès du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), une campagne de mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques basse fréquences en environnement intérieur, à proximité d'équipements électriques. L'objectif de cette étude était de quantifier l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'intérieur des bâtiments, par la caractérisation des sources, la définition d'un protocole de mesure et l'utilisation d'une instrumentation spécifique. Les principaux résultats sont les suivants :

À 5 cm du sol d'une maison équipée d'un plancher rayonnant électrique, le champ électrique mesuré est de 43 V/m, et le champ magnétique de 0,55 μ T. À 45 cm du sol, le champ magnétique est de 0,19 μ T.

Des mesurages à 50 Hz effectués à 40 cm d'un panneau photovoltaïque de 25 cm par 32 cm montrent que l'induction magnétique augmente de 0,22 μ T par kW consommé ; soit 2,2 μ T au maximum de la puissance contractuelle de l'installation visitée. Les mesurages pratiqués dans la pièce située à l'aplomb d'un panneau ne donnent pas de niveaux de champs, électrique ou magnétique à 50 Hz, discriminables dans les champs ambiants (0,1 V/m, 0,01 μ T). Cependant, des niveaux plus élevés de champ électrique sont mesurés à 5 cm d'une cloison dans laquelle sont logés les câbles de descente : 300 V/m, à 50 Hz. Cette valeur reste inférieure aux valeurs limites recommandées (5 000 V/m à 50 Hz).

La valeur maximale d'induction magnétique à proximité d'un radiateur électrique se situait au voisinage de la résistance, et atteignait 0,4 μ T.

Des mesures ont été réalisées à proximité de deux types de plaques de cuisson (thermique et à induction), à puissance maximale (50 Hz) :

- dans le plan équatorial d'une plaque de cuisson électrique thermique, à 85 cm du sol, ce qui pourrait correspondre au niveau du ventre de l'utilisateur, le champ magnétique est de 6 μ T à 20 cm et de 0,4 μ T à 40 cm du centre du foyer. À 1,5 m du sol et à 65 cm du centre du foyer, soit approximativement à la position de la tête de l'utilisateur, l'induction magnétique est de 0,05 μ T. Si les 4 foyers étaient en fonctionnement, le champ magnétique atteindrait 0,2 μ T à l'emplacement de la tête. Les niveaux de champ électrique mesurés à proximité de la plaque n'étaient pas discriminables du champ électrique ambiant.
- à 1,5 m du sol et à 65 cm du centre du foyer d'une plaque de cuisson électrique à induction, l'induction magnétique est de 3,8 μ T, alors que le champ électrique n'est pas discriminable du champ électrique ambiant.

Des mesurages ont par ailleurs été réalisés à 40 cm d'un écran d'ordinateur LCD. Les résultats des mesures sont très proches, que l'écran soit allumé ou éteint (16 V/m et 0,053 μ T, à 50 Hz).

5.2.4 Analyse des données de mesures issues du dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques

5.2.4.1 *Contexte réglementaire*

La loi n°2010-788 du 12 juillet 2010, dite « Grenelle 2 », stipule que :

« Art. 17 bis. - Les personnes chargées du transport de l'énergie électrique doivent réaliser un contrôle régulier des champs électromagnétiques induits par les lignes de transport d'électricité. Le résultat de ces mesures doit être transmis annuellement à l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail qui les rendra publiques ».

L'arrêté du 23 avril 2012 (application article 26 du décret 2011-1697) met en application un dispositif de contrôle et de surveillance des ondes électromagnétiques émises par les réseaux d'électricité.

Le gestionnaire du réseau définit le plan de contrôle, qui est transmis pour accord et contrôle au préfet. Toutes les lignes ont été couvertes fin 2017, ce qui représente concrètement 5 000 points de mesures réalisées entre 2012 et 2017. Un point de mesure est défini par la présence d'au moins une habitation aux alentours de l'intersection entre une ligne à très haute tension et une fraction du territoire (maille Iris définie par l'Insee)³³. RTE choisit ensuite l'endroit précis de la mesure qui maximiserait l'exposition. Ces mesures font l'objet d'une surveillance décennale, c'est-à-dire que tous les points doivent être réévalués tous les 10 ans.

Ces procédures ne concernent que les lignes de transport d'électricité à 400 kV et celles dont l'intensité nominale est supérieure à 400 A.

Par ailleurs, les maires des communes françaises peuvent demander la réalisation de mesures de champs électromagnétiques en réponse à la requête d'un particulier.

Dans les deux cas, un laboratoire indépendant, accrédité par le Comité français d'accréditation (Cofrac) pour la mesure de champ magnétique, réalise les mesures d'exposition, en précisant l'heure et la date. Puis ces données sont transmises à RTE qui tient compte du transit maximal et calcule alors l'intensité extrapolée (95 % de l'intensité maximale de la ligne).

Tous les résultats de ces mesures de champs électromagnétiques sont publiés sur le site <http://cem-mesures.fr>³⁴. Pour chaque mesure, une « fiche de mesure » est disponible indiquant les coordonnées GPS du point de mesure, la date et l'heure précise de la mesure, la valeur maximale mesurée et extrapolée, et parfois le profil de décroissance du champ selon un axe perpendiculaire à la ligne de transport d'électricité.

5.2.4.2 *Methodologie*

RTE a fait réaliser un grand nombre de mesures de champs magnétiques sous les lignes 400 kV, 225 kV, 90 kV et 63 kV, respectivement 646, 1 711, 112 et 300 points de mesures correspondant à une grande variété de configurations de lignes. Chaque point de mesure est référencé par la position géographique de la ligne (coordonnées GPS), la date et l'heure des mesures. Cela permet d'introduire deux facteurs de corrections pour une projection des mesures de champ magnétique dans le pire cas : un premier facteur K_i lié au courant maximal dans la ligne, et un deuxième facteur K_f lié à la température qui va influencer la position du câble par rapport au sol et donc la valeur du champ mesuré à une hauteur de 1 mètre du sol.

5.2.4.3 *Résultats*

Le Tableau 9 résume le résultat des mesures effectuées par RTE. Pour chaque type de ligne (400 kV, 225 kV, 90 kV et 63 kV) la moyenne et la médiane des valeurs de champ magnétique maximum mesurés sont données, ainsi que l'écart-type à la moyenne. Pour chacune des configurations, le champ magnétique maximum théorique (B_{extrap}) est également calculé en tenant compte des facteurs correctifs moyens K_i et K_f .

³³L'Iris (Ilots regroupés pour l'information statistique) constitue la brique de base en matière de diffusion de données infra-communales. Il doit respecter des critères géographiques et démographiques et avoir des contours identifiables sans ambiguïté et stables dans le temps (www.insee.fr).

³⁴ L'Anses renvoie la consultation des résultats de mesures réalisées dans le cadre du plan de contrôle et de surveillance au site internet <http://cem-mesures.fr> par un lien sur sa page d'informations relatives aux champs électromagnétiques basses fréquences : <https://www.anses.fr/fr/content/champs-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-extr%C3%AAmement-basses-fr%C3%A9quences>.

Tableau 9 : Moyenne et médiane des mesures de champs magnétiques sous les lignes 400 kV, 225 kV, 90 kV et 63 kV.

400 kV			225 kV		
	B	B _{extrap}		B	B _{extrap}
Moyenne (μT)	3,84	15,59	Moyenne (μT)	1,83	7,78
σ	3,52	8,55	σ	1,67	4,66
Médiane (μT)	3,06	14	Médiane (μT)	1,39	7

90 kV			63 kV		
	B	B _{extrap}		B	B _{extrap}
Moyenne (μT)	1,38	6,85	Moyenne (μT)	1,47	6,21
σ	0,93	3,55	σ	1,25	4,47
Médiane (μT)	1,205	6	Médiane (μT)	1,13	5,85

Ainsi, le champ magnétique moyen généré sous des lignes 400 kV en fonctionnement est de 3,84 μT (médiane de 3,06 μT). Le champ magnétique extrapolé dans le pire cas est en moyenne de 15,59 μT. En tenant compte de la dispersion, le champ magnétique maximum serait de 32,69 μT, à comparer à la valeur « classique » de 30 μT habituellement considérée pour les lignes à 400 kV. Ces résultats sont extrêmement cohérents pour les autres types de lignes à haute tension et confirment les valeurs de champs magnétiques attendues dans ces cas.

5.2.5 Évaluation du nombre d'habitants et d'écoliers à proximité des lignes à haute tension sur l'ensemble du territoire français

5.2.5.1 Objectif

L'objectif de ce travail original réalisé à l'initiative du groupe de travail et financé par l'Anses est, d'une part, d'estimer le nombre d'habitants potentiellement impactés par la présence d'une ligne à haute ou très haute tension en France et, d'autre part, de dénombrer les établissements d'accueil de jeunes enfants et les écoles du premier degré (maternelles et élémentaires) situées à proximité de ces lignes, et en déduire le nombre d'enfants exposés.

5.2.5.2 Méthode

➤ Descriptif des données utilisées : lignes HT / THT et scénarios d'exposition

Le champ électromagnétique émis par une ligne HT / THT varie selon un très grand nombre de facteurs (puissance de la ligne, disposition des câbles, climat, charge de la ligne, etc.). S'il est envisageable d'estimer le niveau de champ électromagnétique de façon très locale par modélisation informatique, il est impossible de l'appliquer pour l'ensemble des lignes de France. Par conséquent, différents scénarios d'exposition ont été construits, mettant en parallèle la distance à la ligne et le niveau d'intensité du champ magnétique vraisemblablement rencontré à cette distance, pour les tensions de lignes usuellement rencontrées en France. Ces scénarios ont été établis à partir de données de RTE. L'exposition inférieure à 0,1 μT a été considérée comme le niveau arbitraire de non-exposition (Bessou *et al.*, 2013). Les niveaux de 0,3 μT et 0,4 μT, correspondant aux scénarios d'exposition les plus élevés, ont été associés à une augmentation du sur-risque de leucémie infantile dans les études de Greenland *et al.*, (2000) et Ahlbom *et al.*, (2000), respectivement. De plus, considérant les résultats de l'étude Géocap (Sermage-Faure *et al.*, 2013), qui ont montré une augmentation de l'incidence des leucémies de l'enfant pour les enfants de moins de 5 ans habitant à moins de 50 m d'une ligne ≥ 225 kV (*cf.* 6.1.1), un scénario d'exposition correspondant à celui utilisé dans cette étude a également été pris en compte (*cf.* Tableau 10).

Tableau 10 : scénarios retenus pour l'exposition en fonction de la puissance de la ligne

Tension de	Taille de la zone d'effet**			
	Scénario	Exposition	Exposition	Exposition

la ligne	« géocap »	> 0,1 μ T probable	> 0,2 μ T probable	> 0,3 μ T probable	> 0,4 μ T probable
400 kV	50 m	< 145 m	< 99 m	< 82 m	< 72 m
225 kV	50 m	< 67 m	< 44 m	< 36 m	< 30 m
150 kV	0 m	< 49 m	< 28 m	< 22 m	< 18 m
90 kV	0 m	< 35 m	< 20 m	< 15 m	< 11 m
63 kV	0 m	< 35 m	< 20 m	< 15 m	< 11 m

*des deux côtés de la ligne** adapté d'après Bessou *et al*, 2013

À partir du Tableau 10, une « zone tampon » ou couloir d'exposition a été définie à l'aide de l'outil « zone tampon » du logiciel ArcGIS® 10.4. La taille de la zone tampon dépend de la tension de la ligne et du scénario envisagé (cf. Figure 6). L'emprise géographique est limitée à la France métropolitaine.

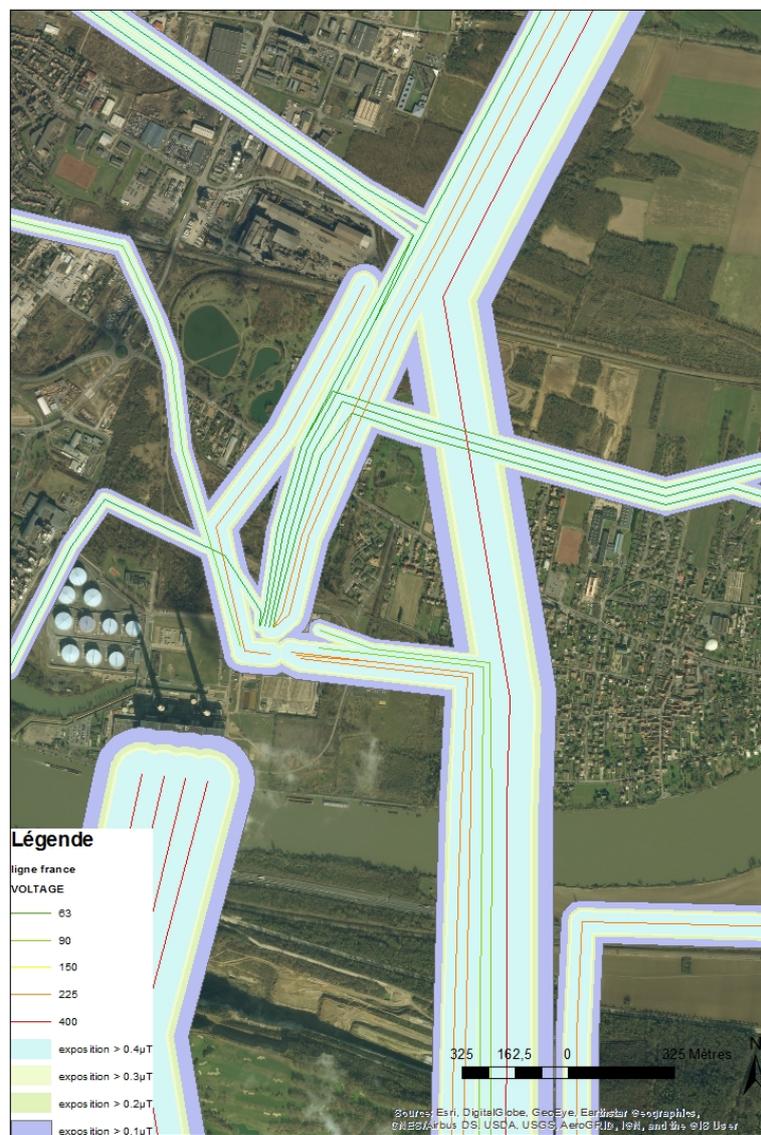


Figure 6 : représentation de la modélisation des scénarios (exemple dans le canton de Mantes-la-Jolie)

➤ **Méthodologie d'estimation du nombre de personnes à proximité des lignes HT / THT**

Le bâti résidentiel a été extrait du bâti indifférencié de la BD Topo® V2.1 de l'IGN et d'Esri France selon plusieurs étapes. Dans un premier temps, une intersection entre les surfaces d'activités (bâti + terrains) et le bâti indifférencié³⁵ a permis d'isoler le bâti lié aux activités (n = 586 794). Ensuite, le bâti lié aux activités a été retiré du bâti indifférencié par différence symétrique afin d'obtenir le bâti résidentiel (n = 31 952 303).

La population présente dans chaque bâtiment résidentiel de France a été déterminée par recouplement entre le bâti résidentiel et l'effectif de la population au sein de chaque carroyage de l'Insee, en répartissant la population dans le bâti proportionnellement à sa surface et au nombre d'étages du logement (cf. description en annexe 3).

La détermination du nombre de bâtiments se trouvant dans les couloirs d'exposition définis pour chaque scénario d'exposition a été effectuée à l'aide de l'outil « intersection » du SIG ArcGIS. L'effectif de la population exposée correspond à la somme des effectifs dans chaque bâtiment concerné. Un bâtiment partiellement inclus dans la zone d'effet a été considéré comme « potentiellement exposé » au champ magnétique. En conséquence, la population du bâtiment a été intégralement comptabilisée.

➤ **Méthodologie d'estimation du nombre d'enfants à proximité d'une ligne HT / THT**

Les établissements d'accueil des jeunes enfants (EAJE) sont des structures qui sont autorisées à accueillir de manière non permanente des enfants de moins de 6 ans. Les données concernant ces établissements et leur capacité d'accueil ont été recueillies grâce à la plateforme opendata.org³⁶ qui diffuse les données des caisses nationales des allocations familiales. Néanmoins, seulement 30 % des enfants de moins de 3 ans fréquentent des EAJE³⁷ et, en raison d'imprécision dans la base de données, seulement 40 % des structures ont été correctement géolocalisées. En conséquence, les résultats concernant ces établissements sont peu fiables et ne sont pas présentés.

La liste des établissements scolaires, issue de la base centrale des établissements du 1^{er} degré, a été obtenue auprès de la Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance du Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche. Cette base de données contient les coordonnées géographiques (latitude / longitude) des 52 225 écoles maternelles et élémentaires accueillant les 6 788 580 enfants scolarisés en France en 2016. Cette liste a été établie le 29 janvier 2016. Les effectifs sont ceux de la rentrée 2014 et proviennent de la base centrale de pilotage du Ministère de l'éducation nationale. La précision de cette géolocalisation n'est pas disponible.

Les coordonnées géographiques des écoles ont été rapprochées des bâtiments inclus dans la BD Topo. Lorsque le ponctuel (c'est-à-dire le point issu de la projection des coordonnées géographiques) était inclus dans un bâtiment, il a été considéré que le bâtiment correspondait à l'école.

Cependant, le ponctuel résultant du géocodage peut être assez éloigné du bâtiment accueillant les enfants (cf. Figure 7, ponctuel en rouge, bâtiment en jaune), il n'est donc pas possible de prendre en compte uniquement le bâtiment le plus proche du ponctuel résultant du géocodage. Par conséquent, lorsque le ponctuel était situé hors d'un bâtiment (géolocalisation grâce à une projection sur la voie par exemple), celui-ci a été rapproché à un bâtiment à partir de l'adresse de l'école grâce à la BD Adresse for ArcGIS Advanced V6 fournie par Esri France. Celle-ci contient le

³⁵ L'ensemble des bâtiments de France et leurs contours sont représentés par une forme géométrique. Le bâti indifférencié comprend le bâti résidentiel et le bâti lié aux activités.

³⁶ Plateforme ouverte des données publiques françaises : <https://www.data.gouv.fr/fr/>.

³⁷ Caisse nationale des allocations familiales. Données 2014

produit Adresse Premium de l'IGN qui comporte 4 composantes dont une qui permet de rattacher un bâtiment (de la BD Topo®) à une adresse de la BD Adresse®.



Figure 7 : rapprochement des résultats du géocodage avec le bâti

Sur les 52 225 écoles du fichier, 36 920 couples de coordonnées ont été mis en relation avec un bâtiment. L'estimation par la méthode du rapprochement avec le bâti ne porte donc que sur 36 920 écoles (70,6 %) (soit 4 904 149 enfants). Le rapprochement d'un ponctuel résultant d'un géocodage et d'un bâtiment n'est pas toujours possible. Les raisons sont multiples et peuvent provenir de nombreux facteurs (imprécision sur les coordonnées, mauvaise complétude des bases de données géographiques...). Néanmoins, même si ce rapprochement conduit à une diminution aléatoire de l'échantillon, l'absence de rapprochement avec le bâti (*i.e.* en ne considérant que les ponctuels de géocodage) peut conduire à une sous-estimation du nombre de bâtiment à prendre en considération.

5.2.5.3 Résultats

➤ Estimation du nombre de personnes vivant à proximité d'une ligne HT / THT en France

La population totale de la France estimée par la méthode de répartition selon les carreaux de l'Insee est de 61 543 200 habitants. Or, au 1^{er} janvier 2011, la population de la France métropolitaine était de 63 070 344 habitants selon le recensement. Ainsi, les estimations qui suivent portent sur 98 % de la population française.

Tableau 11 : estimation du nombre de personnes potentiellement exposées en France

Scénario	Bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%	N (en milliers)	%	N (en milliers)	%
> 0,1 µT	276 272	534,8	0,74	105,5	0,92	26,49	0,87
> 0,2 µT	162 841	327,3	0,46	64,6	0,56	16,19	0,53
> 0,3 µT	126 739	258,1	0,36	51,1	0,45	12,79	0,42
> 0,4 µT	99 673	202,9	0,28	40,2	0,35	10,04	0,33

Scénario	Bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%	N (en milliers)	%	N (en milliers)	%
Géocap	84 237	193	0,27	40	0,35	10,19	0,33

Sur ces 61 millions d'habitants, environ 0,28 % de la population française vit dans une zone potentiellement exposée à un champ magnétique à 50 Hz supérieur à 0,4 μ T. Concernant les enfants, environ 0,35 % des enfants de moins de 15 ans et 0,33 % des enfants de moins de 4 ans vivent dans une zone potentiellement exposée à un champ supérieur à 0,4 μ T. L'utilisation du scénario le plus défavorable montre que la population concernée reste faible (moins de 0,8 % de la population). Le scénario Géocap indique qu'un peu plus de 10 000 enfants de moins de 5 ans vivent à moins de 50 m d'une ligne THT.

Les estimations régionales (découpage régional avant le 1^{er} janvier 2017) sont en annexe 4.

➤ Estimation du nombre d'écoles à proximité d'une ligne HT / THT en France

La correspondance dans le fichier du Ministère de l'éducation nationale entre les coordonnées longitude / latitude existantes et le fichier des bâtiments de la BD Topo dans le fichier du Ministère de l'éducation nationale a permis de retrouver 36 920 bâtiments scolaires (70,7 %).

Tableau 12 : nombre d'écoles du premier degré potentiellement exposées - méthode du bâti

	Taille de la zone d'effet				
	Scénario « géocap »	Exposition > 0,1 μ T probable	Exposition > 0,2 μ T probable	Exposition > 0,3 μ T probable	Exposition > 0,4 μ T probable
Nombre d'écoles impactées en France métropolitaine	64	168	99	83	63
Nombre total d'enfants scolarisés	11 001	24 576	14 162	11 527	8 901
Pourcentage d'enfants scolarisés concernés	0,22 %	0,50 %	0,29 %	0,23 %	0,18 %

Cette méthode évalue qu'environ 0,18 % des enfants scolarisés en France sont potentiellement exposés à un champ magnétique supérieur à 0,4 μ T dans leur école. La principale faiblesse de cette méthode est qu'elle n'a été applicable que sur 70,6 % des écoles françaises.

5.2.5.4 Conclusion

Les résultats de cette étude permettent d'estimer que la population potentiellement exposée est comprise entre 0,28 % et 0,74 % de la population française selon les scénarios d'exposition retenus (respectivement > 0,4 μ T et > 0,1 μ T pour ces deux estimations). Environ 0,35 % des enfants de moins de 15 ans (environ 40 000 enfants) sont potentiellement exposés à un champ supérieur à 0,4 μ T. La variabilité selon les régions est importante. Les trois régions présentant la plus faible proportion de population exposée sont la Picardie, la Basse-Normandie et la Bretagne avec moins de 0,14 % de la population potentiellement exposée dans le scénario 0,4 μ T. Les trois régions les plus exposées sont la région PACA, l'Aquitaine et la Franche-Comté avec une proportion de population potentiellement exposée supérieure à 0,48 %.

La principale limite de cette étude provient de l'estimation de l'exposition en fonction de la distance aux lignes. Le champ magnétique émis par une ligne HT / THT varie selon un très grand nombre de facteurs (puissance, charge, hauteur, disposition des câbles, climat, etc.). S'il est possible de manière très locale de modéliser la propagation du champ électromagnétique basse fréquence, il

est impossible d'envisager cette démarche à une échelle départementale, régionale et plus encore nationale. Les données disponibles permettent uniquement de connaître la densité de champ magnétique maximale et théorique de la ligne. Ainsi, aucune équation ne peut décrire correctement la relation entre la distance et le champ électromagnétique basse fréquence émis par la ligne. L'estimation est fondée sur des scénarios d'exposition dont les valeurs limites sont issues d'une publication réalisée par les ingénieurs de Réseau transport d'électricité (RTE). Les estimations d'émission de champ électromagnétique basses fréquences par les lignes publiées dans cet article ont été réalisées à l'occasion de l'étude Géocap.

Les études visant à estimer la part de la population potentiellement exposée aux champs électromagnétiques basses fréquences émis par les lignes de transport d'électricité sont relativement rares. En France, une étude conduite en côte d'Or, mais dont les résultats n'ont jamais été publiés, a été largement reprise par l'ensemble de la communauté scientifique. Cette étude n'avait pas pour objectif d'estimer le nombre de logements à proximité des lignes mais d'estimer les niveaux de champ électromagnétique basse fréquence présents dans le logement. Les données de cette étude ont néanmoins permis à RTE d'estimer qu'environ 375 000 (0,6 %) personnes vivraient en étant exposées à un champ magnétique supérieur à 0,4 μT , ce qui est compatible avec les estimations de la présente étude (entre 0,3 % et 0,7 % de la population française selon le scénario).

5.3 Exposition de la population professionnelle

5.3.1 Sources d'exposition

Différentes sources de champs électromagnétiques sont présentes spécifiquement en milieu professionnel. Toutes les professions sont concernées, mais à des degrés divers. Ainsi, un photocopieur génère un champ électromagnétique avec une intensité maximale de 1,2 μT , un écran d'ordinateur présente des émissions de l'ordre de 0,7 μT , alors qu'un poste de soudage peut générer des champs avec des intensités de 130 000 μT .

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) a mené en France une étude systématique ayant pour objectif de déterminer les équipements rayonnants et estimer leurs effectifs. À partir de l'expérience des agents de terrain des centres de mesures physiques des Carsat / Cram³⁸, cette étude a permis d'identifier et de recenser les familles d'équipements industriels émettant des rayonnements électromagnétiques liés à leur conception. Les équipements les plus rayonnants ont été regroupés en huit familles selon leur technologie :

- Soudage par résistance
- Magnétiseurs démagnétiseurs
- Chauffage par induction
- Magnétoscopie
- Soudage par pertes diélectriques
- Électrolyse Industrielle
- IRM-RMN
- Micro-ondes

³⁸ Carsat/Cram : Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail / Caisses régionales d'assurance maladie.

Parmi ces familles d'équipements, certains émettent des champs électromagnétiques très basses fréquences (50 Hz) comme le soudage³⁹ par résistance ou la magnétoscopie⁴⁰.

5.3.2 Travailleurs des entreprises de transport et de distribution d'électricité

Chez RTE (Réseau transport d'électricité), 300 personnes travaillent à proximité des lignes THT. Le personnel qui travaille sous tension (travail à proximité des câbles) porte un vêtement de protection en fil d'argent conducteur qui l'isole du champ électrique, mais pas du champ magnétique.

Le personnel réalisant des travaux conventionnels (hors tension ou à distance de sécurité électrique de toutes les pièces sous tension, comme dans un pylône ou dans un poste à haute tension) est exposé au champ électrique et dans une moindre mesure au champ magnétique.

Pour le champ magnétique comme pour le champ électrique, ces travailleurs sont exposés à des valeurs proches des valeurs limites d'exposition professionnelles. Les durées d'exposition ne sont pas mesurées, sauf pour le personnel TST (travail sous tension), qui travaille dans ces conditions entre 10 et 100 heures par an avec une moyenne de 24 heures par an.

RTE a identifié les situations d'exposition dans lesquelles les « valeurs déclenchant l'action » pouvaient potentiellement être dépassées, et a mené des actions pour organiser le travail de manière à rester dans les limites d'exposition réglementaires. Si ce n'était pas possible, RTE a développé des outils pour que les travailleurs identifient rapidement les situations à risque, telle la pince ampèremétrique qui dispose d'une alarme en cas de dépassement de certains seuils.

Ces personnes bénéficient d'un suivi médical particulier, non pas en raison de leur exposition aux champs électromagnétiques, mais pour recevoir l'habilitation au travail sous tension (cf. audition de RTE, 2017).

Chez Enedis, environ 16 000 personnes sont potentiellement exposées à des niveaux importants de champs électromagnétiques basses fréquences :

- environ 1 000 personnes sont chargées d'entretenir le réseau moyenne tension (20 000 V) et sont régulièrement amenées à travailler sous tension ;
- environ 15 000 techniciens travaillent sur le réseau basse tension, majoritairement hors tension mais peuvent être amenés à travailler sous tension. Ils peuvent travailler sur les réseaux aériens ou souterrains de distribution d'électricité. Ils interviennent dans les locaux électriques dans lesquels on trouve les « jeux de barre ». Ils peuvent intervenir de façon sporadique dans les sous-stations électriques qui transforment le réseau de transport en réseau de distribution d'électricité. Parmi cette catégorie de personnel, 8 000 employés sont chargés de réaliser des mesures physiques à proximité des ouvrages.

Le personnel travaillant sous tension est équipé de deux types d'équipements de protection individuels : la protection dite « électrique », gants et casques qui protègent de l'électrisation, et la protection dite « thermique », vêtements qui isolent de la chaleur et protègent d'un arc électrique.

Environ 5 % de la distribution de l'électricité est assurée par des entreprises locales de distribution, qui disposent de leurs propres lignes. Les électriciens de RTE et d'Enedis ne sont donc pas les

³⁹ Le soudage par résistance est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique (50 Hz, 1-4 kHz) et d'une pression ponctuelle appliquées sur deux pièces métalliques. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur de matière. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôles d'acier de faible épaisseur (< 6 mm) telles que celles employées pour les carrosseries d'automobile.

⁴⁰ La magnétoscopie est une technique de contrôle non-destructif qui consiste à créer un champ magnétique intense (statique ou 50 Hz) à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et crée une fuite qui, en attirant les particules (colorées ou fluorescentes) d'un produit révélateur, fournit une signature particulière caractéristique du défaut.

seuls à être exposés à des niveaux élevés de champs électromagnétiques basses fréquences. Par ailleurs, certaines grandes entreprises ou industries qui consomment beaucoup d'électricité peuvent disposer de leur propre poste de transformation électrique. Ils sont raccordés en 20 000, 63 000 ou 90 000V en fonction de leur besoin. Elles sont en charge de la gestion, de la maintenance et de la distribution de ces postes, en collaboration avec RTE ou Enedis (cf. audition d'Enedis, 2017).

5.3.3 Analyse des données d'exposition professionnelle fournies par l'INRS

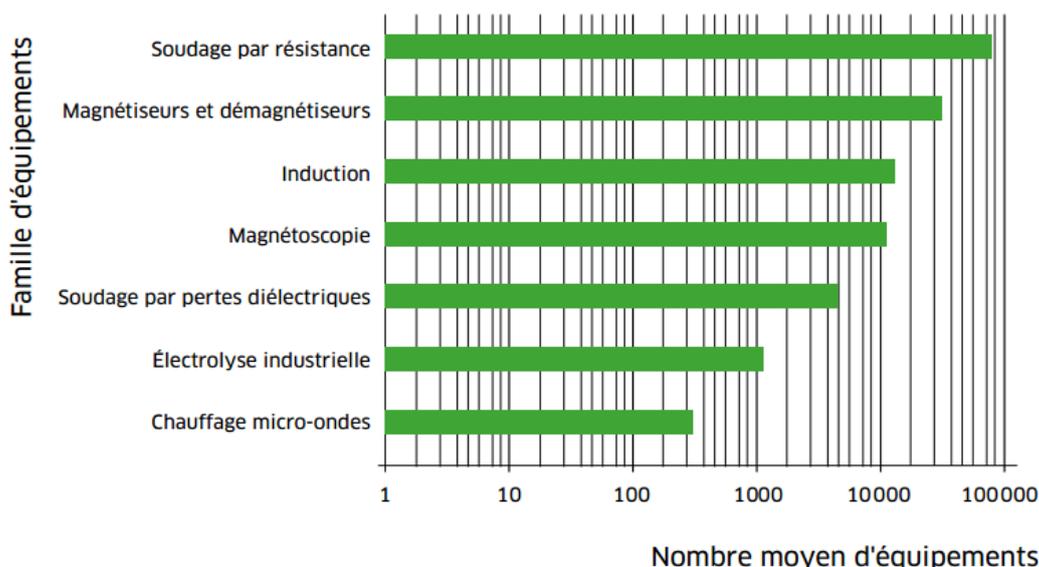
L'INRS a mené une étude⁴¹ systématique sur l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques pour vérifier sur le terrain si les opérateurs sont soumis à des champs supérieurs aux valeurs limites définies par l'ex. Directive 2004/40/CE du parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004, puis de la Directive 2013/35/UE. Cette étude avait pour objectifs de :

- réaliser un bilan des valeurs d'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques ;
- déterminer les équipements les plus rayonnants et estimer leurs effectifs en France ;
- recenser les moyens de prévention existants.

Cette étude a été lancée en collaboration avec la CnamTS (Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés) et visait à réaliser une cartographie de l'exposition à l'ensemble des sources de champs électromagnétiques couvrant tout le spectre des fréquences.

Les données de cette étude ont été réactualisées au moment de la transposition en droit national de la directive 2013/35/UE. Sept grandes familles d'appareils ont été identifiées (machines à soudage par résistance ou par pertes diélectriques, chauffage par induction, systèmes d'électrolyse industrielle, magnétoscopie, etc.). Des mesures ont été effectuées sur 997 postes de travail dans toute la France et les résultats ont été publiés dans un hors-série de la revue « Hygiène et Sécurité du travail »⁴² en décembre 2016.

L'évaluation du parc français des équipements concernés est présentée sur la Figure 8. À partir de ces données, il a été estimé qu'au moins 100 000 travailleurs sont susceptibles d'être exposés à ces appareils.



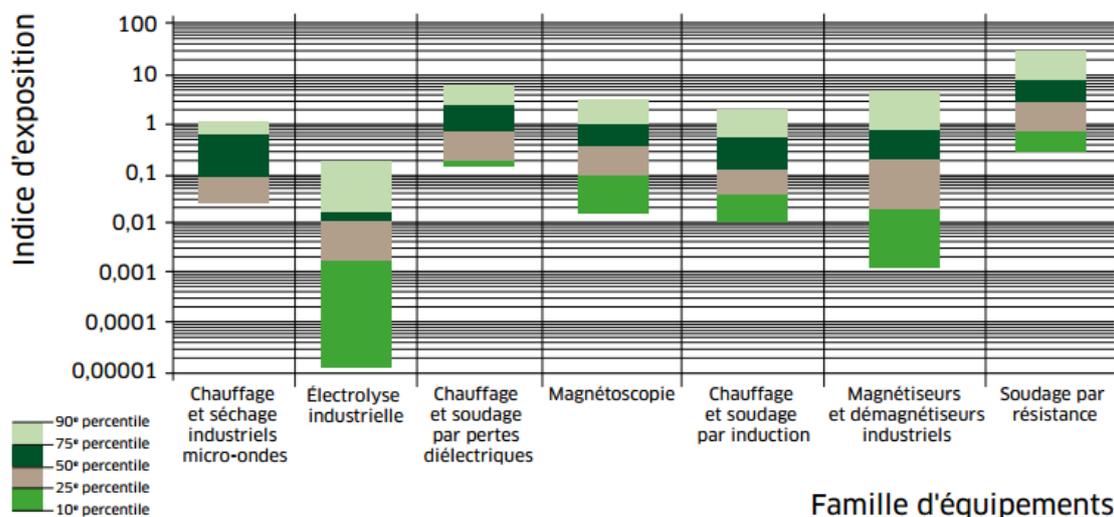
⁴¹« Intégrer le risque « rayonnement électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels », INRS, HST 22 ND 2350 (2011), Desmarests P.

⁴² « Rayonnements optiques et électromagnétiques au travail », INRS, Hygiène et sécurité au travail, Hors-série, décembre 2016.

Figure 8 : estimation du parc français de machines rayonnantes (INRS, 2016)

Pour évaluer le niveau d'exposition à chaque famille d'équipement, un mode opératoire de mesures de champs a été spécifiquement construit.

La valeur déclenchant l'action (VA) définie par la Directive européenne 2013/35/UE considérée ici correspond à la possibilité de stimulations des tissus nerveux et musculaires dans les bandes de fréquences inférieures à 100 kHz. Les résultats des mesures sont présentés sous forme d'indice d'exposition, c'est-à-dire de ratio par rapport à la valeur déclenchant l'action basse. Un indice d'exposition supérieur à 1 signifie que l'exposition excède la valeur déclenchant l'action basse (valeur la plus contraignante). Les 10^{èmes}, 25^{èmes}, 50^{èmes}, 75^{èmes} et 90^{èmes} percentiles ont été calculés pour chaque famille d'équipement. Les résultats montrent que la VA basse est susceptible (pour 25 à 50 % des mesures réalisées) d'être dépassée pour six familles d'équipements sur sept (cf. Figure 9).

**Figure 9 : 10^e, 25^e, 50^e (valeur médiane), 75^e et 90^e percentiles de l'indice d'exposition (ratio par rapport à la valeur déclenchant l'action) dans chaque famille d'équipements (réf. INRS)**

Comme l'indique l'INRS, le nombre de postes de travail ayant fait l'objet de mesurages est cependant trop faible pour certains équipements (démagnétiseurs, chauffage par micro-ondes...), par rapport au nombre d'équipements composant le parc français, pour pouvoir tirer des conclusions sur les niveaux de champ réellement rencontrés sur le terrain pour ces familles d'appareils.

En matière de mesures de prévention, l'étude propose plusieurs stratégies qui permettent de limiter les risques. Cela correspond notamment à éloigner les sources rayonnantes, à l'utilisation de blindage lorsque cela est possible (plus difficile en basse fréquence pour le champ magnétique), et à maîtriser l'exposition en diminuant le temps d'exposition.

Par ailleurs, l'article⁴³ d'Alain Becker dans le numéro hors-série de la revue « Hygiène et Sécurité du travail » présente les résultats de mesures de l'exposition aux champs magnétiques effectuées aux postes de contrôle par magnétoscopie par les centres de mesures physiques des Carsat, de la Cramif et de l'INRS. Ils ont porté sur plus de 60 postes de magnétoscopie et de démagnétisation. On observe pour la magnétoscopie un dépassement de la VA dans 23 % des cas pour le corps (VA de 1 000 μ T) et 64 % des cas pour les mains (VA de 18 000 μ T). Pour la démagnétisation, on

⁴³ « Rayonnements optiques et électromagnétiques au travail », INRS, Hygiène et sécurité au travail, Hors-série, décembre 2016, publiant les résultats présentés lors du colloque du 20, 21, 22 octobre 2015.

observe un dépassement de la VA dans 14 % des cas pour le corps (VA de 1 000 μT) et 50 % des cas pour les mains (VA de 18 000 μT). En ce qui concerne les porteurs d'implants cardiaques actifs, la VA pour le corps (100 μT) est dépassée dans 70 % des cas pour la magnétoscopie et 60 % des cas pour la démagnétisation.

5.3.4 Synthèse bibliographique sur l'exposition en milieu professionnel

Ce paragraphe présente une synthèse des publications parues depuis 2010 sur l'évaluation de l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques.

Contessa *et al.* (2010) ont mené une campagne de mesure de champs magnétiques sur les principales lignes de train en Italie (90 % du réseau). Les mesures ont été réalisées avant 2010, sur des trains alimentés en courant continu (tension 3 kV) pour la locomotion (ce qui est également le cas de certaines lignes de train en France). Toutes les mesures ont été effectuées à bord du train pendant le service régulier dans tous les endroits potentiellement accessibles au personnel. L'exposition évaluée dans cette étude concerne les lignes 3 kV qui alimentent les trains, mais également l'ensemble des appareils électriques présents qui sont alimentés en courant alternatif. Le spectre de fréquences des signaux est relativement complexe et se situe dans la bande de fréquence < 1 kHz. En courant continu, les champs mesurés varient de quelques dizaines de μT à quelques centaines de μT , jusqu'à parfois 1 mT. Les champs magnétiques en courant alternatif (< 1 kHz) sont de l'ordre de 2 μT avec quelques valeurs ponctuelles de 20 à 40 μT .

Gobba *et al.*, (2011) ont cherché à évaluer la contribution spécifique de l'exposition professionnelle à l'exposition totale sur 24 heures aux champs magnétiques basses fréquences à la fréquence du courant (50 – 60 Hz), dans le but de créer une matrice emploi-exposition. L'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences de 543 travailleurs a été mesurée en Italie pendant deux jours en utilisant des exposimètres individuels. Une deuxième campagne de mesures a été effectuée six mois après la première série, sur 53 sujets, pour vérifier la répétabilité des résultats. Le niveau moyen pondéré dans le temps a été calculé dans l'habitation ou à l'extérieur. L'exposition médiane (5^{ème} et 95^{ème} percentile) au travail, dans l'habitation et à l'extérieur de l'habitation est respectivement de 0,14 μT (0,04 μT – 2,50 μT) ; 0,03 (0,01 μT – 0,24 μT) et 0,05 μT (0,02 μT – 0,28 μT). Dans cette étude, l'exposition professionnelle représentait 60 % de l'exposition totale sur 24 heures. Les niveaux médians d'exposition dans l'habitation et à l'extérieur représentent 20 et 28 % du niveau de l'exposition professionnelle. Les auteurs soulignent l'hétérogénéité des niveaux d'exposition pour un même emploi, ce qui a pour conséquence le risque de biais de classement dans les études épidémiologiques utilisant une matrice emploi-exposition.

Huang *et al.* (2011) ont comparé l'exposition de dentistes pratiquant en Chine dans des cabinets médicaux à celle de dentistes à hôpital, dans l'hypothèse où les cabinets étant souvent plus petits, la densité d'appareils est plus élevée, induisant une exposition majorée. Trente-deux dentistes travaillant dans des cabinets médicaux, et trente-trois dentistes employés dans des services d'odontologie hospitaliers ont été recrutés sur la base du volontariat, afin de porter un exposimètre individuel (Emdex) pendant 3 heures lors de la réalisation de soins, mesurant les champs électromagnétiques dans la bande 40 Hz – 1 kHz. En parallèle, des mesures dans l'environnement (entre 25 et 35 points) et à proximité des équipements usuels pour la pratique de soins dentaires (chaise, machine à ultrasons, lumière pour polymérisation et système de stérilisation par ultraviolet) ont été réalisées. Les résultats montrent une légère surexposition moyenne des dentistes pratiquant en cabinet médical par rapport à ceux employés à l'hôpital (0,55 μT vs 0,15 μT). Les dentistes pratiquant en cabinet médical passent 19 % de leur temps au-dessus de 0,4 μT , contre 14 % pour les hospitaliers. Les valeurs de champs au contact de la chaise, de la machine à ultrasons, de la lumière pour polymérisation et du système de stérilisation à ultraviolet sont respectivement de 13 μT , 48 μT , 19 μT et 23 μT , mais ces valeurs décroissent rapidement avec la distance.

Úbeda *et al.* (2011) ont cherché à caractériser l'exposition en Espagne du personnel médical et technique des hôpitaux aux champs électromagnétiques basses fréquences dans la gamme de fréquences de 5 Hz à 2 kHz, à travers des mesures environnementales instantanées et un suivi

personnel des travailleurs. L'étude a été menée dans différentes parties d'un hôpital employant 4 400 personnes. Sachant que la plupart du personnel hospitalier dispose de deux, ou plus, postes de travail, les niveaux d'exposition sont vraisemblablement répartis inégalement dans l'espace et le temps. Les résultats indiquent que la fréquence majoritaire rencontrée est de 50 Hz. Les niveaux moyens d'expositions individuelles pour le personnel hospitalier sont compris entre $0,03 \pm 0,01 \mu\text{T}$ (chez les infirmières) et $0,39 \pm 0,13 \mu\text{T}$ (chez les physiothérapeutes). Les auteurs concluent que la description de l'environnement électromagnétique par des mesures ponctuelles sur le lieu de travail, bien que cohérente avec les données de la surveillance personnelle, pourrait ne pas estimer adéquatement l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences dans certaines catégories professionnelles, qui sont par ailleurs soumises à des niveaux de champs plus importants.

Çam *et al.*, (2011) ont estimé l'exposition au champ magnétique (dans la bande 5 Hz – 32 kHz) du personnel travaillant dans les bureaux situés au-dessus ou à proximité des postes de transformation et des sous-stations électriques en Turquie. Les mesures ont été effectuées dans deux banques nationales et une entreprise industrielle comptant plus de 500 employés. Vingt-cinq pourcents des niveaux mesurés étaient inférieurs à $0,3 \mu\text{T}$. Le niveau maximal mesuré était de $6,8 \mu\text{T}$. Les expositions médianes et moyennes du personnel étaient de $1,19 \mu\text{T}$ et $0,56 \mu\text{T}$. L'exposition moyenne mesurée reste cohérente avec le niveau généralement mesuré dans les habitations proches de transformateurs.

Rahman *et al.* 2011 ont évalué les niveaux de champ magnétique au-dessus de locaux de transformateurs et de salles de distribution basse tension dans des immeubles de bureaux ou des bâtiments commerciaux de grande hauteur en Malaisie. Les analyses de ces mesures ponctuelles indiquaient que ces niveaux sont plus élevés au-dessus des salles de transformateurs qu'au-dessus des salles de commutation basse-tension. En effet, au sol, au-dessus du local du transformateur, le champ magnétique varie entre $0,36$ et $2,48 \mu\text{T}$ et au-dessus des salles de distribution il est compris entre $1,47$ et $1,13 \mu\text{T}$. Ces niveaux sont plus élevés que ceux retrouvés dans les locaux de transformateurs d'immeubles résidentiels.

Safigianni *et al.* (2012) ont mesuré les niveaux de champs magnétiques et électriques basses fréquences dans une sous-station 400 / 150 kV et 150 / 20 kV en Grèce (5 Hz à 30 kHz). Les auteurs rapportent des valeurs maximales de champs magnétiques de $700 \mu\text{T}$ à la sortie du premier transformateur et de $350 \mu\text{T}$ à la sortie du second. L'exposition dans la salle de contrôle a été évaluée autour de 1 à $10 \mu\text{T}$. La valeur maximale du champ électrique est de $21,25 \text{ kV/m}$, supérieure à la valeur limite d'exposition professionnelle. Cependant, les auteurs soulignent que ces valeurs de champs diminuent fortement avec la distance et que les niveaux mesurés dans les postes d'accès aux techniciens sont, quant à eux, inférieures aux valeurs limites d'exposition professionnelle. Les auteurs précisent néanmoins qu'en cas de travaux et lors de l'entretien, les techniciens peuvent être exposés à ces niveaux pendant de courtes périodes. Les mesures réalisées autour de la sous-station montrent des niveaux de champs électrique et magnétique inférieurs aux valeurs limites réglementaires pour le public.

Koppel *et al.*, (2013) se sont intéressés à l'exposition en Estonie aux champs électromagnétiques basses fréquences (50 – 400 kHz) et radiofréquences (800 – 2,5 MHz) dans des bureaux en réalisant des mesures dans 69 postes de travail informatiques présentant des configurations différentes (ordinateur fixe ou portable, clavier externe ou interne, moniteur interne ou externe, alimentation sur courant alternatif ou batterie, connexion internet sans fil ou non, positionnement de l'ordinateur près du corps ou non). Les niveaux de champs électromagnétiques maximaux ont été mesurés au niveau de 14 points définis du corps, répartis entre la tête, le torse et les membres (*cf.* Figure 10). Les résultats montrent que

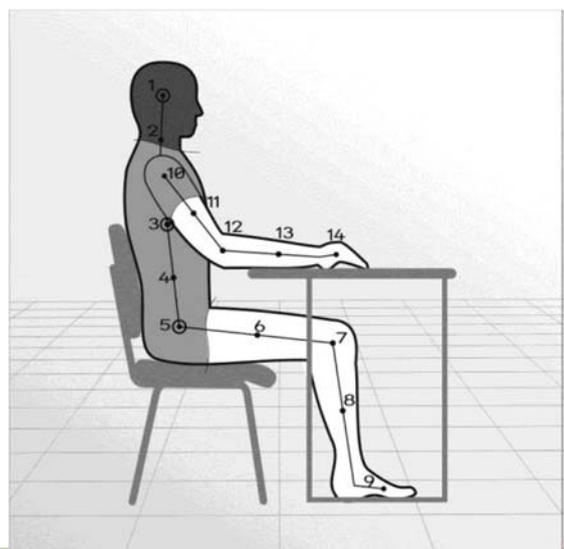


Figure 10 : Le système de 14 points de mesure de Koppel. (Koppel *et al.*, 2013)

les membres sont les parties du corps les plus exposées (0,7 μT pour le champ magnétique).

Teşneli *et al.* (2014) ont évalué l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences dans une usine d'onduleurs (45 Hz – 1 kHz) en Turquie. Les mesures de champs électriques et magnétiques ont été effectuées dans les lignes de production, les zones d'essai et les sous-stations électriques pour des situations de travail réelles. Les valeurs maximales de champ électriques et magnétiques sont présentées dans le Tableau 13. Les champs magnétiques sont relativement importants dans les zones d'essais, ce qui pose la question des conditions des tests qui pourraient être plus sévères que celles correspondant aux conditions nominales de fonctionnement.

Tableau 13 : valeurs de champs électriques et magnétiques mesurés dans une usine d'onduleurs (Teşneli *et al.* (2014))

	Champ électrique	Champ magnétique
Ligne de production	26,7 V/m	7,6 μT
Zone d'essai	992 V/m	216,6 μT
Poste électrique	165,5 V/m	65 μT

Hosseini *et al.*, (2015) ont mené une étude dont le but était de déterminer les zones à risque basées sur l'évaluation de l'exposition aux champs basses fréquences (50 / 60 Hz) dans les sous-stations électriques d'un complexe pétrochimique dans le sud de l'Iran, afin d'établir des mesures de gestion ou de prévention. Les niveaux de champs magnétiques maximaux se situaient entre 0,02 μT (dans la pièce de contrôle du complexe) et 49,30 μT (dans le poste de chaudière). Les résultats montrent également que les espaces autour des panneaux entrants, des transformateurs et des câbles sont les zones les plus exposées des sous-stations électriques intérieures. Bien que la méthodologie utilisée ne soit pas irréprochable (les mesures ont été réalisées avec des sondes axiales, ce qui nécessite de prendre des mesures dans les 3 axes et d'en faire la somme vectorielle), les résultats obtenus sont cohérents avec les données de la littérature.

Dans le cadre d'un colloque de l'INRS, I. Magne (Service des études médicales d'EDF) a présenté une synthèse des mesures pour l'évaluation de l'exposition des travailleurs d'EDF. L'exposition des travailleurs dans l'ensemble du parc EDF a été évaluée à partir de sites représentatifs, en considérant le fait que les champs électriques et magnétiques dépendent de paramètres physiques tels que la géométrie des conducteurs, le niveau de tension, l'intensité du courant, etc. Des sites ont été sélectionnés pour y organiser des campagnes de mesure, représentant la diversité des situations du parc EDF : sites de production nucléaire, thermique et hydraulique. Le protocole de mesure est conforme à la norme IEC 61786 – 2 :2014, le champ électrique a été mesuré dans des conditions d'hygrométrie favorables (< 70 %) et le champ magnétique mesuré alors que le courant dans les installations était proche de la charge maximale. Les mesures ont été effectuées au poste de travail dans des situations représentatives de la position de travail et en utilisant le mesureur EFA-300 (Narda) et des appareils portatifs Emdex II pour vérifier le champ magnétique mesuré par celui-ci. Les champs mesurés varient en fonction des postes de travail :

- quelques dizaines de microteslas autour des alternateurs ;
- des valeurs dépassant la VA basse (1 000 μT) à proximité des barres évacuant l'énergie des alternateurs ou au contact des câbles de puissance alimentant certains équipements ;
- quelques dizaines à quelques centaines de microteslas à proximité des connexions des transformateurs ;

- un champ électrique de l'ordre de 10 kV/m et un champ magnétique de quelques dizaines à 100 μ T dans les postes d'évacuation de l'énergie ;
- un champ magnétique supérieur à 1 000 μ T au contact des câbles alimentant les moteurs mais qui décroît en dessous de 100 μ T au poste de travail.

Les auteurs de cette étude concluent que les niveaux de champs électrique et magnétique sont sans risques en se tenant à distance des sources, c'est-à-dire quelques dizaines de centimètres pour les sources de champs magnétiques.

L'étude bibliographique montre que les niveaux d'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences sont très variables suivant l'environnement de travail, en fonction de la présence d'appareils émettant des champs électromagnétiques plus ou moins importants. Ainsi, dans plusieurs cas de figure (machines à souder, transformateurs, etc.), les niveaux d'exposition peuvent être supérieurs aux limites déclenchant l'action. Ces situations anormales nécessitent de mettre en place des mesures de prévention et des stratégies qui permettent de limiter les risques, notamment par l'éloignement des sources rayonnantes, l'utilisation de blindage lorsque c'est possible et la diminution des temps d'exposition.

5.4 Cas particulier de l'exposition de la femme enceinte et du fœtus

Dans le cas particulier de la femme enceinte, deux questions peuvent se poser :

- 1) est-ce que ses spécificités anatomiques modifient son exposition ?
- 2) est-ce que le fœtus est protégé si la mère est exposée à un niveau de champ proche des valeurs limites d'exposition pour les travailleurs ?

5.4.1 Évaluation dosimétrique et respect des valeurs limites d'exposition de la femme enceinte

La recommandation européenne 1999/519/CE propose des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences pour la population générale et les travailleurs. La directive européenne 2013/35/UE définit, elle, des valeurs limites d'exposition spécifiquement pour les travailleurs. Ces documents n'incluent cependant pas de valeurs limites d'exposition spécifiques aux femmes enceintes. Peu de publications sont par ailleurs disponibles sur le respect des valeurs limites d'exposition pour les femmes enceintes. Les études récentes les plus informatives sont celles de Liorni *et al.*, 2014, 2015a et 2015b.

Les auteurs se sont posé la question suivante : les restrictions de base chez la femme enceinte sont-elles respectées lorsque celle-ci est exposée à un niveau de champ atteignant les valeurs limites d'exposition chez les travailleurs ?

La justification de cette question est liée aux changements anatomiques de la femme enceinte qui pourraient modifier la répartition des courants internes. Liorni *et al.*, (2014 et 2015a et b) ont analysé les scénarios où la femme enceinte est exposée à un champ magnétique uniforme à 50 Hz au niveau maximal autorisé pour la population générale (100 μ T) dans la recommandation européenne, ou lorsqu'elle est exposée à la valeur d'action maximale autorisée par la directive européenne concernant l'exposition des travailleurs (1 mT, 6 mT) (*cf.* chapitre 4). Des simulations ont été réalisées sur des modèles humains réalistes, qui intègrent de nombreux facteurs, tels que l'âge gestationnel, la variation de la posture du fœtus et l'orientation du champ magnétique.

Les résultats montrent que l'exposition des femmes enceintes respecte toujours les recommandations européennes pour la population générale, quel que soit l'âge gestationnel. Pour l'exposition professionnelle, le champ électrique interne induit chez la femme enceinte respecte les valeurs limites définies par la directive européenne.

5.4.2 Évaluation dosimétrique et respect des valeurs limites pour le fœtus

L'exposition du fœtus a également été évaluée selon différents modèles pour chaque âge gestationnel et chaque scénario d'exposition et comparée à la valeur limite d'exposition pour la population générale. Les questions sont les mêmes que dans le cas des femmes enceintes :

- la densité de courant interne induit chez le fœtus est-elle inférieure aux restrictions de base fixées par la recommandation 1999/519/EU lorsque les femmes enceintes sont exposées à un champ magnétique à 50 Hz ?
- les champs électriques internes induits chez le fœtus sont-ils inférieurs aux restrictions de base fixées par les lignes directrices de l'Icnirp de 2010, lorsque les femmes enceintes sont exposées à un champ magnétique à 50 Hz à un niveau correspondant au niveau de référence maximal admissible établi dans les lignes directrices de l'Icnirp ou à la valeur d'action haute fixée dans la Directive européenne 2013/35 /UE ?

Il faut également souligner que la Directive européenne 2013/35/UE ne propose aucune évaluation spécifique de la conformité de l'exposition chez le fœtus puisque le fœtus n'est pas un travailleur. Par conséquent, les limites d'exposition pour le grand public doivent être prises en compte dans toutes les situations d'exposition du fœtus.

Liorni *et al.*, (2014, 2015a, b) ont étudié la densité de courant interne induit (mA/m^2) ou l'intensité du champ électrique interne induit (V/m) dans différents tissus du fœtus lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique uniforme de 50 Hz à différents niveaux d'exposition :

- au niveau de référence maximal autorisé pour la population générale dans la réglementation européenne ($100 \mu\text{T}$) ;
- au niveau de référence maximal autorisé pour la population générale dans les lignes directrices de l'Icnirp (2010) ($200 \mu\text{T}$) ;
- aux valeurs d'action basse et haute de la Directive européenne pour les travailleurs (respectivement 1 mT ou 6 mT).

Les modèles de fœtus ont été utilisés dans la simulation, y compris plusieurs facteurs influents (âge de gestation, posture, etc.). L'estimation des quantités dosimétriques a été réalisée par dosimétrie déterministe (Liorni 2014, 2015a) ou par des méthodes stochastiques (Liorni 2015b).

Les résultats montrent que la densité de courant interne induit ou l'intensité du champ électrique interne induit chez le fœtus dans tous les scénarios d'exposition augmente avec le stade de la grossesse en raison de l'augmentation de la taille des organes et des tissus fœtaux. Par exemple, quels que soient les scénarios d'exposition, à 9 mois de gestation, le pic de densité de courant interne dans certains tissus est toujours supérieur à la restriction de base de la recommandation de l'UE (1999) lorsque l'exposition est de $100 \mu\text{T}$ (Liorni, 2015a). En revanche, selon les récentes recommandations de l'Icnirp, le champ électrique interne maximal induit dans chaque tissu fœtal est inférieur aux limites de l'Icnirp (2010) pour tous les stades de la grossesse dans le cas d'une exposition à $200 \mu\text{T}$ (Liorni *et al.*, 2015b). Par conséquent, il existe toujours une incertitude scientifique quant à la conformité de l'exposition du fœtus aux valeurs limites d'exposition de la population générale au champ magnétique de 50 Hz.

Par ailleurs, les champs électriques induits internes dans les tissus du SNC fœtal dépassent les limites de la restriction de base fixée par l'Icnirp en 2010 pour le grand public, si la femme enceinte en situation de travail est exposée à 1 mT (valeur d'action basse de la directive 2013/35/UE à 50 Hz) à 7 ou 9 mois de grossesse, ou à 6 mT (valeur d'action haute de la directive 2013/35/UE), quel que soit le stade de la grossesse (Liorni, 2015a). Toutefois, il convient de souligner que, selon le Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre des directives 2013/35/UE(2015), les femmes enceintes sont dans la catégorie des « travailleurs à risque particulier », et des mesures de sécurité supplémentaires doivent être appliquées afin de fournir une protection adéquate.

5.5 Perspective d'évolution des sources d'exposition

Les sources de champs électromagnétiques identifiées précédemment définissent un environnement électromagnétique qui n'a cessé d'évoluer avec le développement industriel et l'avènement des nouvelles technologies. Cet environnement électromagnétique continue d'évoluer, surtout au regard des innovations dans le transport de l'électricité avec les nouveaux réseaux électriques intelligents (ou *Smart Grids*), et le développement de la voiture électrique.

Dans cette évolution du réseau, le *Smart Grid* est le réseau électrique de nouvelle génération. Il s'agit de rendre le réseau « intelligent » et communicant, en intégrant au réseau actuel une infrastructure de télécommunication reliant le producteur d'électricité au consommateur. Cet échange d'informations, bidirectionnel et en temps réel, entre l'électricien et l'utilisateur final, devrait permettre ainsi un pilotage fin du réseau en temps réel.

Même s'il n'existe pas de définition admise par tous les acteurs des *Smart Grids*, rendre les réseaux « intelligents » consiste pour ceux qui les développent à améliorer l'intégration des systèmes énergétiques et la participation des utilisateurs de réseaux. Ces derniers doivent être profondément reconfigurés pour intégrer la production décentralisée de sources d'énergies renouvelables à grande échelle, et pour favoriser une offre adaptée à la demande en mettant à la disposition du consommateur final des outils et services lui permettant de connaître sa consommation personnelle, et donc d'agir sur elle.

L'évolution vers les *Smart Grids* peut s'expliquer par le changement profond et radical du contexte énergétique mondial. Du côté de la production, on cherche à intégrer davantage de sources de production électrique d'origines renouvelables, lesquelles sont intermittentes, diffuses et peuvent être éloignées des centres de consommation (fermes éoliennes *off-shore* ou centrales solaires en plein désert). Du côté de la consommation, la consommation électrique mondiale a plus que doublée en 30 ans ; elle devrait continuer sur la même tendance de croissance au moins jusqu'en 2035, selon les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie. À titre d'exemple, l'avènement de la voiture électrique pourrait doubler la consommation électrique de chaque foyer⁴⁴.

Dans les réseaux électriques, la production est généralement centralisée et peut être d'origine diverse : nucléaire, hydraulique, fossile ou renouvelable avec l'énergie solaire ou éolienne. Les consommateurs également sont très variés : des industriels et notamment les industries lourdes, qui sont généralement connectées aux réseaux de distribution, les usines, les immeubles ou les maisons individuelles. Le réseau est donc constitué de l'ensemble des infrastructures matérielles et logicielles regroupant les lignes de tension, les transformateurs d'alimentation, les sous-stations et les installations de gestion des flux.

Une des problématiques majeures du réseau de transport et de distribution de l'électricité est la difficulté à stocker l'électricité de façon durable, ce qui demande une coordination permanente pour ajuster la production à la consommation. Cette question devient aujourd'hui d'autant plus critique que les sources de production se sont très largement diversifiées et décentralisées, avec notamment le développement de la production d'énergies renouvelables issue des consommateurs eux-mêmes (panneaux solaires, etc.). Il devient ainsi de plus en plus important de gérer les différents flux de production et de consommation qui rendent le réseau électrique plus complexe. Cependant, lors de l'audition de leurs représentants, Enedis a indiqué être en mesure de stocker de l'énergie électrique en moyenne tension dans des batteries situées dans les sous-stations et mener des expérimentations pour stocker de l'énergie en basse tension, dans le cas où la production serait supérieure à la demande.

Le réseau électrique connaît actuellement de profondes mutations. On s'attend en effet à la fois à une transformation de la chaîne de valeur de l'énergie et des services publics. Cela répondrait à une nouvelle donne économique, les changements climatiques et autres préoccupations environnementales, ainsi que la sécurité de l'approvisionnement en énergie. La part accrue des

⁴⁴ Etude ALCIMED - 110407 DP - Smart Grids - avril 2011

énergies renouvelables et leur répartition non homogène, couplée au vieillissement des équipements et à la dégradation de leurs performances dans les processus de génération d'énergie devraient amener à la mise en place de technologies de rupture et une importance grandissante du rôle des consommateurs dans la maîtrise de la demande d'énergie.

En Europe, ces mutations sont motivées par les objectifs 2020 du paquet énergie climat (auquel s'ajoutent en France le Grenelle de l'environnement et la Programmation pluriannuelle des investissements) qui vise à l'horizon 2020 à :

- réduire de 20 % la consommation d'énergie ;
- produire au moins 20 % de son énergie finale à partir des énergies renouvelables ;
- diminuer de 20 % les rejets de CO₂ dans l'atmosphère.

Pour incorporer de manière accrue les énergies renouvelables, le paysage énergétique devrait donc évoluer vers une production diversifiée et décentralisée. Le caractère intermittent des productions d'énergies renouvelables, couplé au fait que le stockage de l'énergie électrique est encore mal maîtrisé pour l'instant, implique pour les gestionnaires de réseau de recourir à une structure de communication capable d'aider à maintenir l'équilibre du réseau. Les gestionnaires du réseau doivent être en mesure de connaître en temps réel le profil de production/consommation ainsi que la stabilité du réseau et la qualité de l'énergie électrique fournie. C'est là que le *Smart Grid* est sensé intervenir pour surveiller et contrôler le réseau grâce à la gestion de flux importants de données ; ces derniers provenant de capteurs judicieusement positionnés sur le système et des réseaux de communication.

Ces évolutions majeures pourront avoir un impact sur l'environnement électromagnétique auquel seront soumis la population générale et les travailleurs : la multiplication des systèmes de production de l'électricité renouvelables décentralisés au plus près des populations et le déploiement de nouvelles technologies (capteurs et réseaux de communications) dans les foyers d'habitation et sur le réseau électrique lui-même. La question de l'exposition liée au déploiement des compteurs communicants en France a fait l'objet d'une expertise de l'Anses (Anses, 2017). Que ce soit pour leur fonctionnement (communication avec le concentrateur) ou pour la télé-relève de la consommation, les compteurs communicants utilisent des bandes de fréquences situées dans le domaine des radiofréquences et n'entrent donc pas dans le cadre de la présente expertise.

Aucune autre étude n'est disponible à ce jour pour estimer l'évolution de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques basses fréquences.

5.6 Conclusion

La revue bibliographique des études sur l'exposition aux champs magnétiques basse fréquence de la population générale et des travailleurs montre des différences dans les niveaux auxquels sont exposées ces deux catégories de population. De façon générale, la population est exposée dans l'environnement à des valeurs moyennes comprises entre 0,01 et 0,1 μ T, pouvant atteindre quelques microteslas à proximité des lignes électriques à haute tension et des transformateurs, et quelques centaines de microteslas lors de l'utilisation de certains appareils domestiques. Concernant l'exposition aux lignes de transport d'électricité, environ 0,28 % de la population française serait potentiellement exposée à un champ supérieur à 0,4 μ T (0,33 % des enfants de moins de 4 ans).

Par ailleurs, il a été montré, par des simulations numériques, que la densité de courant induit chez le fœtus dans le cas de l'exposition de la mère au travail, peut être supérieure aux valeurs limites d'exposition européennes recommandées pour la population générale⁴⁵ (100 μ T à 50 Hz).

Chez les travailleurs, les niveaux d'exposition peuvent être, dans des situations bien particulières, supérieurs aux valeurs limites réglementaires (« valeurs déclenchant l'action », par exemple 1 000 μ T à 50 Hz pour le champ magnétique). Ces situations requièrent une analyse au cas par cas de l'environnement électromagnétique du poste de travail pour mettre en place des mesures de réduction de l'exposition par l'éloignement des sources et la réduction des durées d'exposition.

⁴⁵ Si les conditions d'exposition d'une femme enceinte au travail sont régies par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques, le fœtus, lui, n'est pas un travailleur. Son exposition aux champs électromagnétique doit être conforme à la recommandation 1999/519/CE du 12 juillet 1999 de l'Union européenne concernant la population générale, définie dans le décret n°2002-775 du 3 mai 2002.

6 Études épidémiologiques

Depuis 2010, les études épidémiologiques ayant investigué les effets sur la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences se sont majoritairement concentrées sur l'incidence des leucémies de l'enfant. Néanmoins, de nombreuses études ont également porté sur les tumeurs du système nerveux central chez l'enfant, les cancers chez l'adulte et les maladies neurodégénératives. Ce chapitre présente l'analyse des études épidémiologiques publiées entre 2010 et 2015. Les caractéristiques et principaux résultats des études analysées ci-après sont rassemblées dans des tableaux (cf. Tableau 14 à Tableau 23). L'évaluation du niveau de preuve, qui intègre à la fois les données issues des conclusions des expertises antérieures, et les éléments de preuve apportés par l'analyse des études publiées entre 2010 – 2015, est décrite dans le chapitre 8.

6.1 Leucémies de l'enfant

Les leucémies sont les cancers les plus fréquents chez les enfants de moins de 15 ans : 28 %, soit environ 500 nouveaux cas chaque année en France. Dans 80 % des cas, il s'agit de leucémies aiguës lymphoblastiques (LAL), alors que le type myéloblastique (LAM) habituel de l'adulte ne représente que 17 % des cas. Les 3 % restants se répartissent en leucémies myéloïdes chroniques et leucémies myélomonocytaires subaiguës, dont l'incidence est très faible. Plus de 80 % des LAL sont des LAL B dites communes, c'est-à-dire dont les cellules affichent les marqueurs des étapes précoces de la différenciation B. La distribution des LAL B communes décrit un pic maximum vers l'âge de 2-3 ans, plus marqué chez les garçons que chez les filles, et encore nettement visible un peu après 6 ans. Le sex-ratio est de 1,2 garçons pour 1 fille.

Peu de facteurs de risque ont été identifiés de manière certaine dans les leucémies aiguës de l'enfant. Par exemple, il existe des prédispositions génétiques comme l'existence d'une trisomie 21, que l'on retrouve dans 2 % des leucémies aiguës ou d'autres anomalies de réparation de l'ADN (syndrome de Bloom, ataxie-télangiectasie, syndrome de Wiskott-Aldrich, anémie de Fanconi). Les facteurs iatrogènes comme la radiothérapie et la chimiothérapie (alkylants et inhibiteurs des topoisomérases 2) sont responsables de la survenue de leucémies secondaires, en grande majorité des LAM. Sur le plan des facteurs environnementaux, seules les radiations ionisantes à forte dose (survivants d'Hiroshima et Nagasaki) ont été établies comme facteurs de risque certains des LA de l'enfant.

D'autres facteurs de risque sont fortement soupçonnés, sur la base de plusieurs études concordantes : le retard des premiers contacts avec les infections banales (hypothèse hygiéniste de Greaves), les mouvements de population augmentant le risque de contracter un agent infectieux causal (hypothèse de Kinlen), les insecticides domestiques (principalement l'utilisation par la mère pendant la grossesse) (Bailey *et al.*, 2015).

D'autres facteurs sont retrouvés dans certaines études et doivent être confirmés : l'exposition résidentielle aux radiations d'origine naturelle (radon, rayonnements gamma telluriques et cosmiques), la pollution liée au trafic automobile intense, la consommation de tabac paternelle pré-conceptionnelle.

Ces éléments ont été confirmés lors de l'audition de Jacqueline Clavel, qui a exposé les résultats de ses travaux sur les leucémies dans le cadre des études cas-témoins Escalé et Estelle (Rudant 2010, 2015a). Dans ces études, des analyses plus récentes ont montré le rôle des polymorphismes des gènes ARID5B et IKZF1 impliqués dans la différenciation lymphocytaire (Rudant *et al.*, 2015b). Ces découvertes incitent à prendre en compte ces nouveaux facteurs de susceptibilité génétique dans la recherche étiologique sur les facteurs de risque environnementaux des leucémies aiguës de l'enfant.

6.1.1 Exposition des enfants

Les études épidémiologiques se heurtent de manière récurrente à la mesure de l'intensité du champ électromagnétique. Celle-ci (mesure individuelle, approximation par la distance à la ligne HT/THT la plus proche, modélisation informatique de l'intensité du champ en fonction de la distance, *etc.*) conditionne le type d'étude qui peut être conduite et, bien entendu, le nombre de sujets potentiellement inclus. Ainsi, les résultats des études épidémiologiques seront rapportés en fonction de la façon dont l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences a été estimée dans l'étude.

- **Études basées sur la distance et/ou la modélisation**

Les études « cas-témoins » utilisant la distance entre la ligne HT/THT comme marqueur d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sont les plus fréquentes. Ces études présentent l'avantage de pouvoir inclure un grand nombre de cas puisqu'elles ne nécessitent pas d'investigation particulière auprès des individus. Elles s'appuient en général sur les registres de population, ce qui garantit l'absence de biais de sélection des cas. Les calculs de distance reposent le plus souvent sur l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) pour lier l'adresse de l'enfant (adresse de résidence ou de naissance) et la ligne HT/THT la plus proche. Une étude Californienne récente (Kheifets *et al.*, 2015; Crespi *et al.*, 2016) a combiné à la fois une mesure par SIG et des mesures de terrain.

L'étude Géocap (Sermage-Faure *et al.*, 2013), conduite à partir des cas enregistrés par le registre national des cancers de l'enfant en France entre 2002 et 2007 est, à ce jour, la seule étude française publiée sur l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de leucémies de l'enfant. Les témoins ont été tirés au sort dans la population générale. En considérant l'ensemble des lignes de transport d'électricité (> 63 kV), les enfants résidant à une distance inférieure à 50 m d'une ligne ne présentaient pas de sur-risque significatif (ORa⁴⁶ = 1,2 [0,8 – 1,9]). En ne considérant que les lignes supérieures à 225 kV, le sur-risque était proche du seuil de significativité statistique pour les enfants résidant à moins de 50 m d'une ligne (ORa = 1,7 [0,9 - 3,6]). Ce sur-risque n'était significatif que chez les enfants de moins de 5 ans (ORa = 2,6 [1,0 - 6,9]), avec une tendance significative en fonction de la distance et chez les enfants habitant dans les communes les moins urbaines (de moins de 100 000 habitants). Malgré une très bonne puissance statistique (2 779 cas, 30 000 témoins), les effets rapportés dans cette étude demeurent à la limite du seuil de significativité, sauf pour les enfants de moins de 5 ans habitant à moins de 50 m d'une ligne supérieure à 225 kV, où la sur-incidence est statistiquement significative. Les principales limites de cette étude sont :

- une période d'inclusion limitée (5 ans seulement), ne permettant pas d'étudier l'évolution temporelle de la sur-incidence rapportée ;
- la prise en considération de l'adresse au diagnostic uniquement, sans connaissance de l'histoire résidentielle des enfants ;
- l'imprécision du géocodage pour certains cas (30 % de géocodage imprécis parmi les enfants habitant à moins de 200 mètres d'une ligne).

Les analyses de sensibilité montrent en effet un lien plus fort après suppression des cas imprécis. La direction et la force des associations rapportées par cette étude sont compatibles avec les

⁴⁶ L'Odds ratio (OR) ou rapport de cotes (RC) est calculable à la fois dans les enquêtes de « cohorte » où les patients constituent un échantillon représentatif d'une population générale, et dans les enquêtes « cas-témoins » où le quota de malades est déterminé à l'avance par rapport aux non-malades. Il se calcule comme un rapport de deux probabilités complémentaires : la probabilité P qu'un évènement survienne / probabilité 1-P que cet évènement ne survienne pas. Quand la maladie est rare, il est très proche du risque relatif (RR).

ORa : Odds ratio ajusté issu d'un modèle multivarié prenant en compte les facteurs d'ajustement du modèle.

effets rapportés dans la littérature internationale. Il convient donc de prendre en compte avec attention les résultats de cette étude, et particulièrement pour les enfants de moins de 5 ans vivant à moins de 50 m d'une ligne à très haute tension.

Une étude a été conduite à partir des cas de leucémies infantiles entre 1968 et 2006 au sein du registre des cancers du Danemark (Pedersen *et al*, 2014b). L'exposition a été estimée à partir de l'adresse du domicile à la naissance en fonction des caractéristiques des lignes, pylônes, date de construction, flux électrique, *etc.* (Olsen *et al.*, 1993). Cette étude n'a pas identifié de risque pour les enfants nés à moins de 200 m d'une ligne > 132 kV. Les auteurs rapportent une augmentation non significative du risque (ORa = 1,76 [0,82 - 3,77]) pour les enfants nés entre 200 m et 600 m d'une ligne supérieure à 220 kV. Les auteurs soulignent que cette augmentation de l'OR pour cette catégorie de distance pourrait être due au hasard, en raison du faible nombre de cas et de témoins concernés par cette exposition. L'absence de cas à moins de 200 m d'une ligne d'une tension supérieure à 220 kV limite la comparabilité avec les autres études internationales.

S'intéressant aux cas de leucémies, de cancer du système nerveux central et de lymphomes, une autre étude (Pedersen *et al*, 2015) s'est intéressée à l'évolution du sur-risque de ces pathologies pour différentes périodes au Danemark. Dans le cas des leucémies infantiles, cette étude note une disparition du sur-risque au cours du temps, passant d'un ORa = 5,72 (1,40 – 23,36) pour la période 1968 - 1986 à un ORa = 0,88 (0,32 - 2,42) pour la période 1987 - 2003.

Une étude réalisée en Angleterre (Bunch *et al*, 2014) utilisant les cas diagnostiqués dans le registre national des cancers de l'enfant du Royaume-Uni sur une longue période (1962 - 2008) a également souligné la diminution régulière de l'association entre les champs électromagnétiques basses fréquences et la sur-incidence de leucémies. Les résultats de ces deux études constituent un apport fiable et récent de l'épidémiologie au questionnement sur l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les leucémies infantiles. Si une disparition de l'association mise en évidence concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences au cours du temps devait se confirmer, cette disparition de l'effet ne serait pas en faveur d'un lien de causalité direct entre une exposition à des champs magnétiques liée à la présence de ligne HT et un sur-risque, et pourrait s'expliquer par des co-expositions, dans l'hypothèse où l'évolution technologique n'a pas modifié l'exposition.

Une vaste étude (Kroll *et al*, 2010), incluant près de 29 000 cas de cancers issus du registre national des cancers de l'enfant du Royaume-Uni sur la période 1962 - 1995, n'a pas rapporté d'augmentation significative du nombre de cas de leucémies (RR⁴⁷ = 2,00 [0,18 - 22,04]) pour des enfants nés à proximité d'une ligne émettant un champ > 0,4 µT. Malgré un très grand nombre de sujets inclus, cette étude se caractérise par un très faible nombre de cas et de témoins exposés à un champ > 0,4 µT (2 cas et 1 témoin), expliquant ainsi la largeur de l'intervalle de confiance et ne permet pas de conclure à un excès de risque.

Une étude particulièrement ambitieuse a été conduite à partir du registre des cancers de Californie (Kheifets *et al*, 2015). Le registre a identifié 6 645 cas de leucémies infantiles (dont 5 788 croisés avec succès avec le registre des naissances) et 3 858 cas de cancer du système nerveux central. L'originalité de l'étude repose sur le fait que les calculs de distance ont été complétés par des visites sur site (sur une sélection des habitations les plus exposées) afin de confirmer le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. De plus, l'ensemble de l'histoire résidentielle a été prise en compte. Utilisant des mesures d'exposition fondées sur un calcul de distance entre l'adresse des cas de leucémies et le tracé des lignes, le design de cette étude est le plus complet parmi l'ensemble des études analysées. Les résultats de cette étude ont été publiés

⁴⁷ Le risque relatif (RR) peut se calculer dans les études de cohortes ou les études transversales, lorsque l'on a un groupe de personnes exposées à un facteur de risque et un groupe de personnes non exposées à ce même facteur de risque. Le risque relatif est le rapport suivant :

$$RR = \frac{\text{nombre de personnes malades et exposées} / \text{nombre total de personnes exposées}}{\text{nombre de personnes malades et non exposées} / \text{nombre total de personnes non exposées}}$$

récemment (Crespi *et al.*, 2016 ; Kheifets *et al.*, 2017)⁴⁸. Une augmentation non significative du nombre de cas de leucémies (tous types confondus) a été rapportée (ORa = 1,4 [0,7 - 2,7]) pour les enfants nés à moins de 50 m d'une ligne supérieure à 200 kV. Au-delà de cette distance, les auteurs soulignent qu'ils ne sont pas en mesure de mettre en évidence une association. L'analyse restreinte aux LAL donne des résultats similaires (OR = 1,3 [0,6 - 2,7]) et les LAM n'ont pas été analysés. L'analyse basée sur le calcul des champs retrouvait elle aussi une augmentation non significative du risque de leucémie (tous types confondus) (ORa = 1,57 [0,65 - 3,80]) au-delà de 0,4 µT (Kheifets *et al.*, 2017). Comme la majorité des études évaluant l'intensité des champs à travers la distance séparant la résidence (ou le lieu de naissance) des enfants et la proximité d'une ligne HT/THT, les autres sources d'exposition n'ont pas été enquêtées.

Une étude cas-témoins réalisée dans deux villes du Nord de l'Italie entre 1986 et 2007 a inclus 64 cas d'hémopathies malignes identifiés dans le registre hospitalier des cancers de l'enfant (Malagoli *et al.*, 2010). Chaque cas a été apparié à 4 témoins tirés au sort dans la population générale (bases municipales). Les auteurs rapportent une augmentation du risque de développer une hémopathie pour les enfants exposés à un champ supérieur à 0,4 µT (ORa = 2,4 [0,1 - 42,6]). Néanmoins, en dépit d'une méthodologie d'évaluation des expositions très intéressante (modélisation informatique), le faible nombre de cas et de témoins (64 cas et 256 témoins) et, par conséquent, la grande incertitude de l'estimation du risque (intervalle de confiance très large) ne permettent pas de conclure à l'existence d'un risque accru de leucémie chez les enfants exposés.

Enfin, une étude a cherché à identifier une sur-incidence des cancers de l'enfant à proximité des lignes souterraines (Bunch *et al.*, 2015). La distance entre l'habitation et les câbles souterrains a été déterminée à partir de la cartographie nationale du réseau souterrain, puis, pour les adresses situées à moins de 40 m du câble souterrain, les logements ont été identifiés grâce à l'outil *Google street view*. Enfin, quelques visites sur sites ont été réalisées afin de préciser la localisation de l'habitation. Utilisant le registre des cancers du Royaume-Uni, cette étude n'a pas mis en évidence de lien entre la proximité d'un câble souterrain et une sur-incidence des cas de leucémies (ORa = 2,5 [0,6 - 10,2] pour une distance < à 10 m). Les champs électromagnétiques basses fréquences émis par les câbles souterrains étant essentiellement concentrés dans une bande de 10 m de part et d'autre du câble, ceci explique le très faible nombre de cas et de témoins exposés. Les auteurs soulignent que l'étude de l'exposition aux câbles souterrains présente l'intérêt de pouvoir étudier l'effet propre des champs magnétiques basses fréquences liés au transport de l'électricité. En effet, ces câbles ne produisent pas de champ électrique, ni d'effet corona (*cf.* ci-dessous). Selon les auteurs, l'absence de lien retrouvé avec les câbles souterrains conforterait l'hypothèse que le lien observé avec les lignes aériennes s'expliquerait par d'autres facteurs que les champs magnétiques.

- **Études recherchant des biais ou facteurs de confusion**

Plusieurs études ont cherché à expliquer les mécanismes des associations (ou du manque d'association) retrouvées dans les études épidémiologiques (Swanson, 2013 ; Pedersen *et al.*, 2014a ; Slusky *et al.*, 2014 ; Swanson *et al.*, 2014)

La mobilité résidentielle peut être un facteur de confusion dans les études sur les leucémies de l'enfant, puisqu'il a été montré que le risque de leucémie était augmenté dans les populations à forte mobilité. L'étude de Swanson (Swanson, 2013) a recherché si, dans la population du Royaume-Uni, les personnes habitant près des lignes HT déménageaient plus souvent que les autres. Ce travail réalisé à partir des données du registre électoral n'a cependant pas fait la preuve d'une plus grande mobilité des personnes domiciliées à moins de 100 mètres des lignes HT. La limite principale de cette étude est l'exhaustivité incomplète du registre électoral (90 %) avec une

⁴⁸ Ces publications ne font pas partie du corpus identifié grâce aux équations de recherche bibliographique. Néanmoins, le protocole de cette étude ayant été publié pendant la période de référence, ces publications ont été incluses dans ce rapport.

chance plus importante que les individus à forte mobilité et ayant de jeunes enfants n'y figurent pas, réduisant ainsi la possibilité de mettre en évidence ce lien.

Une étude sur un sous-ensemble de la « *Northern California Childhood Leukemia Study* » a recherché l'effet potentiel de biais de sélection sur la relation entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences estimée par les codes de câblage⁴⁹ des lignes HT et les leucémies de l'enfant, en étudiant plusieurs groupes témoins (Slusky *et al.*, 2014). Comme le calcul des codes de câblage ne nécessite pas l'accord des personnes, il a été possible de les calculer pour tous les sujets, y compris ceux qui n'avaient pas accepté de participer à l'étude cas-témoins par questionnaire (non participants). Les codes de câblage ont ainsi été calculés pour les malades participants (n = 310), les malades non participants (n = 66) et 3 groupes témoins : les participants (n = 174), les non participants (n = 252) et les participants de remplacement (pas premier choix, n = 220). Les auteurs observent des niveaux légèrement différents dans les estimations des OR en comparant les cas aux 3 groupes de témoins mais ces résultats restent non significatifs quel que soit le groupe témoin choisi (absence de biais de participation).

Une hypothèse sur le mécanisme de l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques et la survenue de leucémies est que les champs interagissent avec des particules présentes dans l'air, augmentant ainsi l'effet nocif de ces particules. C'est l'hypothèse des ions corona⁵⁰ (Fews, 1999).

Cette hypothèse a été évaluée par Swanson (Swanson *et al.*, 2014) à partir des données de leur étude conduite au Royaume-Uni (Draper *et al.*, 2005). Dans cette étude, l'exposition aux ions corona a été modélisée en fonction de 4 paramètres : la puissance de la source (capacité de la ligne HT), la distance à la ligne, la direction du vent (rose des vents) et la force du vent, pour aboutir à un score d'exposition pour chaque individu. Les résultats ne sont pas en faveur de cette hypothèse, le score d'exposition aux ions corona expliquant moins bien l'association aux leucémies que la simple distance. Néanmoins, le modèle utilisé comporte des limites car les données sur les vents proviennent de seulement 8 stations météorologiques, pouvant être éloignées de certaines résidences, et la modélisation de la force de la source ne prend pas en compte d'autres facteurs que le voltage et le type de conducteur alors que d'autres facteurs peuvent impacter la production d'ions corona. Ainsi, bien que ne confortant pas cette hypothèse d'ions corona, cette étude ne permet pas non plus de la réfuter totalement.

À partir des données du registre danois portant sur la période 1968-1991, soit 1 024 cas de leucémies aiguës et 2 048 témoins appariés, Pedersen *et al.* ont étudié les interactions entre la distance aux lignes HT et la pollution de l'air liée au trafic routier (NOx) ainsi que le radon domestique (Pedersen *et al.*, 2014a). Aucune interaction n'a été retrouvée avec les NOx. En revanche, il existait une interaction positive entre la concentration domestique en radon (≥ 42 Bq/m³) et la proximité des lignes (< 200 m) (OR = 2,88 [1,01 - 8,27]). Cependant, aucun effet dose n'était objectivé et les analyses de sensibilité faisant varier les seuils d'exposition effaçaient l'association mise en évidence. Enfin, l'association entre champs électromagnétiques et leucémies n'était pas modifiée après ajustement sur les autres facteurs de confusion, comme le niveau socio-économique, le degré d'urbanisation de la commune, l'âge de la mère ou le rang de naissance. Les auteurs concluaient que l'interaction entre les champs électromagnétiques et le radon pouvait être due au hasard.

⁴⁹ Le code de câblage est le classement d'un logement en fonction de la distance à une ligne et du diamètre de câblage de cette ligne, qui a été utilisé dans l'étude de 1979 par Wertheimer et Leeper.

⁵⁰ Des niveaux élevés de champ électrique émis par les lignes à haute tension peuvent charger des petites particules qui sont alors appelées des « ions corona ». Selon l'hypothèse de Fews, ces ions se lient aux polluants présents dans l'air et peuvent se répandre jusqu'à quelques kilomètres de la ligne par le vent. Ces polluants peuvent être inhalés ou déposés sur la peau d'un individu, et leur charge augmenterait leur probabilité de pénétrer et d'être retenu dans l'organisme. Ce phénomène pourrait entraîner une absorption accrue des polluants pour les personnes vivant près des lignes de transport d'électricité, ce qui augmenterait l'exposition et donc l'effet néfaste des polluants sur la santé.

Quelques études identifiées n'ont pas été prises en compte en raison de leurs limites méthodologiques (Sohrabi *et al.*, 2010 ; Tabrizi & Bidgoli, 2015 ; Tabrizi & Hosseini, 2015). La première est une étude cas-témoin ayant inclus 300 cas et 300 témoins recrutés dans 4 centres hospitaliers de la province de Téhéran. Les résultats ne sont pas exposés clairement sous forme de tableaux et peuvent comporter un biais de sélection, lié au choix de l'échantillon (groupe témoin hospitalier potentiellement non représentatif de la population générale). Les deux autres articles de Tabrizi posent les mêmes problèmes : un nombre très faible de sujets (22 cas et 100 témoins), une imprécision sur le recrutement des témoins et une exposition mal définie.

- **Études basées sur des mesures**

En marge des études utilisant la distance séparant le domicile de l'enfant et la ligne HT la plus proche comme indicateur d'exposition, des études ont cherché à identifier l'exposition aux champs électromagnétiques grâce à des mesures de champ sur site (dans la chambre de l'enfant le plus souvent). Dans ce cadre, les lignes à HT/THT ne sont plus l'unique source de champs électromagnétiques basses fréquences car l'ensemble des sources domestiques sont prises en compte.

Une étude « cas-témoins » conduite en Italie a mesuré les champs électromagnétiques basses fréquences dans la chambre d'enfants pendant 24 / 48h (Salvan *et al.*, 2015) grâce à un appareil Emdex II. En dépit d'un très grand nombre de mesures (609 cas avec des mesures dans la chambre de l'enfant et 904 mesures dans la chambre des témoins), cette étude n'a pas trouvé de lien entre l'intensité du champ magnétique et une sur-incidence de leucémies infantiles. Le pourcentage d'enfants exposés était néanmoins très faible (moins de 2 % exposés à plus de 0,3 μ T), réduisant ainsi la puissance statistique de l'étude. Par ailleurs, cette étude souffre d'un biais de recrutement puisque le taux de participation était de 92 % chez les cas et de seulement 71 % chez les témoins. Malgré l'utilisation de moyens très importants (plus de 1 500 mesures) et l'inclusion de tous les cas de leucémies survenant dans 15 régions italiennes pendant 3 ans, cette étude n'a pas une puissance statistique permettant de conclure à un éventuel lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la sur-incidence des leucémies chez l'enfant.

Au Brésil, une étude a utilisé conjointement les deux approches d'estimation de l'exposition (mesures et approximation de l'exposition grâce à des calculs de distances pour les cas de l'agglomération de Sao Paulo) (Wünsch-Filho *et al.*, 2011). Les cas ont été recrutés à partir de 8 hôpitaux de l'état de Sao Paulo, qui regroupent seulement 50 % des cas de cet état. Comme pour l'étude italienne, le faible nombre de cas (particulièrement chez les plus exposés) n'a pas permis de conclure à une association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et une sur-incidence des leucémies infantiles.

Une étude utilisant un sous-échantillon de la « Northern California Childhood Leukemia Study » a étudié d'une part, l'influence propre des courants de contact sur la sur-incidence des leucémies infantiles, et d'autre part, les courants de contact comme éventuel facteur de confusion dans la relation entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de leucémie (Does *et al.*, 2010). Les résultats de l'étude ne montrent pas d'association entre l'exposition aux courants de contact et la leucémie. De plus, la corrélation entre l'intensité des courants de contact et l'intensité du champ magnétique était faible. L'étude ne prouve pas non plus que les courants de contacts soient un facteur de confusion mais il faut souligner le manque de puissance de l'étude.

Une étude identifiée n'a pas été prise en compte dans l'expertise, du fait de ses limites méthodologiques (Jirik *et al.*, 2012). Il s'agit d'une étude cas-témoins hospitalière réalisée en République tchèque, avec de très faibles effectifs (82 cas, 81 témoins) et aucune prise en compte de facteurs de confusion. La faible puissance de cette étude peut expliquer l'absence d'association retrouvée.

Les études fondées sur des mesures de champ, en raison de la difficulté de leur mise en œuvre et du coût associé, ne peuvent inclure qu'un nombre limité de cas et, en conséquence, possèdent une faible puissance statistique. Ce constat explique probablement le faible nombre d'études

utilisant cette méthodologie. Ainsi, la probabilité d'observer une relation statistiquement significative avec une seule étude utilisant des mesures de champ réalisées sur le terrain est pratiquement nulle. C'est pourquoi les analyses poolées⁵¹, combinant les données de plusieurs études, sont particulièrement adaptées pour augmenter la puissance statistique, et tenter de répondre à la question de l'influence des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence des leucémies de l'enfant.

- **Analyses poolées et méta-analyses**

Étant donnée la relative rareté des pathologies étudiées et le faible nombre d'enfants exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences, les analyses poolées représentent une méthode particulièrement intéressante. Ces analyses incluent l'ensemble des données recueillies dans différentes études pour les combiner.

Concernant l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de leucémies infantiles, Kheifets *et al* ont conduit une analyse poolée de 7 études (au Brésil, en Allemagne, en Italie (2 études), au Japon, en Australie et au Royaume-Uni) (Kheifets *et al.*, 2010a). Cette analyse portant sur plus de 10 000 cas de leucémies et près de 13 000 témoins montre une augmentation du risque à la limite du seuil de significativité statistique pour les enfants exposés à un champ $> 0,3 \mu\text{T}$ (ORa = 1,52 [0,91 - 2,54]), après ajustement sur différents facteurs de confusion (âge, sexe, niveau socioéconomique). Considérant la distance aux lignes HT, les auteurs rapportent une augmentation significative du risque pour les enfants à moins de 50 m d'une ligne à haute-tension (ORa = 1,59 [1,02 - 2,50]). Malheureusement, les analyses n'ont pas été conduites sur différentes classes d'âge ou sur différents voltages. Ceci limite les possibilités de comparaison de ce résultat avec ceux de l'étude française Géocap qui rapportait elle aussi une sur-incidence de leucémie chez les enfants de moins de 5 ans habitant à moins de 50 m d'une ligne $> 225 \text{ kV}$. Enfin, les résultats de cette analyse poolée sont du même ordre de grandeur que les OR rapportés par les deux grandes analyses poolées précédentes (Ahlbom *et al*, 2000 ; Greenland *et al*, 2000) .

Une méta-analyse (Zhao *et al.*, 2014a) portant sur 9 études « cas-témoins » conduites à travers le monde de 1997 à 2010 (Allemagne (2 études), Canada (2 études), Japon, Nouvelle Zélande, Royaume Uni, Italie et États-Unis) a rapporté une association significative entre une exposition à un champ magnétique $\geq 0,4 \mu\text{T}$ pour les leucémies (ORa = 1,57 [1,03 – 2,40]) et plus particulièrement pour les leucémies aiguës lymphoblastiques (ORa = 2,43 [1,30 – 4,55]). En plus du seuil de $0,4 \mu\text{T}$ généralement étudié dans les études épidémiologiques, cette étude a considéré plusieurs niveaux d'expositions aux basses fréquences ($0,1 \mu\text{T}$, $0,2 \mu\text{T}$, $0,3 \mu\text{T}$ et $0,4 \mu\text{T}$). Ainsi, au seuil de $0,3 \mu\text{T}$, les auteurs rapportaient une augmentation du risque de leucémie très proche du seuil de significativité (ORa = 1,44 [0,99 – 2,10]). En dessous de ce seuil de $0,3 \mu\text{T}$, les ORa n'étaient plus significatifs. Néanmoins, en regroupant les individus en deux catégories d'exposition (supérieur ou inférieur à $0,2 \mu\text{T}$), le groupe d'exposition le plus élevé présentait un risque accru de leucémie (ORa = 1,31 [1,06 - 1,61]). Les critères d'inclusion de l'étude incluaient la nécessité de présenter les niveaux d'exposition des sujets en matière de champ magnétique. Néanmoins, aucune différence n'était faite entre les études qui avaient utilisé des outils de mesure de type Emdex et les études ayant modélisé la valeur du champ selon la distance. Ceci a pour conséquence que les études incluses ont des effectifs très différents (de 46 cas pour l'étude de Magoli, à 9 653 cas pour l'étude de Kroll dont seulement 2 exposés à un champ $> 0,4 \mu\text{T}$). Les auteurs concluent tout de même à la possibilité d'un lien entre l'exposition aux champs magnétiques et les leucémies de l'enfant.

Une dernière étude de type analyse poolée a été publiée en Autriche en 2014 (Leitgeb, 2014). Cette étude visait à combiner les résultats de 36 études épidémiologiques sans aucun critère *a priori*. L'absence de recherche de comparabilité entre les études épidémiologiques ne permet pas

⁵¹ Les analyses poolées regroupent l'ensemble des observations (données individuelles) alors que les méta-analyses ne regroupent que les résultats des études.

de prendre en compte les résultats de cette étude dans cette expertise. Par conséquent, ils ne sont pas présentés dans ce rapport.

- **Évaluation de l'impact sanitaire**

Quelques études ont estimé l'impact en matière de santé publique d'un risque accru de leucémie de l'enfant lié à l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences. Une telle estimation repose sur l'évaluation du nombre d'enfants exposés aux niveaux de champs potentiellement à risque (en général $\geq 0,3 \mu\text{T}$) et fait l'hypothèse d'un lien causal entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de leucémie. L'étude de Kroll *et al.* estimait ainsi l'incidence de la leucémie infantile attribuable à l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences à environ 1 cas tous les 4 ans au Royaume-Uni (Kroll *et al.*, 2010). Teepen *et al.* (Teepen et van Dijk, 2012) ont utilisé les résultats de 3 analyses poolées conduites sur ce sujet (Ahlbom *et al.*, 2000; Greenland *et al.*, 2000 ; Kheifets *et al.*, 2010a). Ils estiment ainsi qu'environ 2 % des enfants seraient exposés à un niveau de champ $\geq 0,3 \mu\text{T}$, avec une variation de 0 à 7 % selon les études. La proportion attribuable des leucémies de l'enfant aux champs électromagnétiques basses fréquences demeure limitée à environ 2 % de l'ensemble des cas de leucémies. La revue de littérature réalisée par Schüz en 2011, portant sur les mêmes études, était en accord avec l'étude de Teepen *et al.* (Schüz, 2011). Plus récemment, Grellier *et al.* ont utilisé les données publiées dans 18 études récentes pour estimer le nombre de cas potentiellement attribuables à l'exposition non professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences dans l'Union européenne (Grellier *et al.*, 2014). Selon le modèle exposition-réponse utilisé, la proportion de cas attribuables passe de 0,30 % (modèle catégoriel) à 1,86 % (modèle linéaire sans seuil) avec des intervalles de confiance très larges. Le nombre annuel de cas dans l'Union européenne attribuables aux champs électromagnétiques basses fréquences est donc très imprécis : estimation de 61,1 (-8,9 – 609,7) dans l'hypothèse la plus haute (modèle linéaire sans seuil).

6.1.2 Exposition professionnelle des parents

L'exposition des parents peut également jouer un rôle dans le développement des cancers de l'enfant, par son impact sur les cellules germinales en cas d'exposition pendant la période préconceptionnelle, ou sur le développement embryonnaire en cas d'exposition de la mère pendant sa grossesse. Quelques études se sont intéressées à l'exposition professionnelle des parents aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Une étude cas-témoins basée sur le registre allemand des cancers de l'enfant a recherché si les enfants de parents professionnellement exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences avant la conception avaient un risque accru de développer un cancer (Hug *et al.*, 2010). L'histoire professionnelle des parents a été recueillie par questionnaire et entretien téléphonique, et l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques a ensuite été estimée à l'aide d'une matrice d'exposition professionnelle. L'analyse portant sur 846 cas de leucémies aiguës et 2 382 témoins n'a pas mis en évidence d'augmentation du risque de cancers chez les enfants dont les pères étaient exposés à des champs supérieurs à $0,2 \mu\text{T}$. Basée sur des effectifs beaucoup plus faibles, l'exposition professionnelle des mères n'était pas liée non plus à la survenue de leucémies chez les enfants.

Dans une étude cas-témoins menée en Australie et portant sur les leucémies chez les enfants de moins de 15 ans, les parents ont été interrogés sur les activités menées dans leur vie professionnelle (Reid *et al.*, 2011). Des variables d'exposition ont été créées pour chaque type d'exposition incluant l'exposition aux champs électromagnétiques. L'information sur l'histoire professionnelle a été obtenue chez 379 mères et 328 pères des cas, ainsi que chez 854 mères et 748 pères de témoins. Aucun lien n'a été retrouvé entre l'exposition aux champs électromagnétiques des pères ou des mères et la leucémie de l'enfant, quelle que soit la période d'exposition.

En Grande Bretagne, une étude de très grande envergure a pu être menée, recrutant les cas à partir du registre national des cancers de l'enfant relié au registre des naissances dans lequel les

emplois des pères sont enregistrés en routine (Keegan *et al.*, 2012). L'étude a porté sur plus de 15 000 cas de leucémies et autant de témoins tirés au sort à partir du registre des naissances. Il n'y avait pas de lien entre une exposition élevée des pères aux champs électromagnétiques et l'ensemble des leucémies chez les enfants. Une association significative a été retrouvée uniquement avec le sous-groupe le plus rare et le plus hétérogène de leucémies (« autres leucémies »), ce qui ne conforte pas l'hypothèse d'un lien causal entre l'exposition professionnelle paternelle aux champs électromagnétiques et le risque de leucémie chez les enfants.

Depuis 2010, les résultats significatifs concernant une éventuelle sur-incidence des leucémies infantiles proviennent essentiellement d'études utilisant comme marqueur d'exposition la distance entre le domicile et la ligne HT/THT la plus proche. Elles mettent en évidence une association entre une sur-incidence des leucémies infantiles et une distance inférieure à 50 m, cette relation étant surtout significative pour les lignes supérieures à 225 kV (Sermage-Faure *et al.*, 2013, Kheifets *et al.*, 2010a). Si ces études permettent d'inclure un grand nombre de cas (et donc une grande puissance statistique), elles sont relativement peu précises concernant la mesure de l'intensité du champ magnétique. Les études ayant recherché un lien entre l'apparition de leucémie infantile et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences en ayant réalisé des mesures ne mettent pas en évidence d'association (Salvan *et al.*, 2015, Wünsch-Filho *et al.*, 2011, et Does *et al.*, 2010).

Par ailleurs, deux études conduites depuis 2010, prolongeant leurs analyses antérieures aux années plus récentes, notent une disparition progressive de l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et une sur-incidence des leucémies infantiles au cours du temps, ce qui n'est pas en faveur de la causalité de cette association (Pedersen *et al.*, 2015 ; Bunch *et al.*, 2014). De plus, les études épidémiologiques ne peuvent par nature contrôler l'ensemble des facteurs environnementaux auxquels sont soumis les individus. Ainsi, la sur-incidence à proximité des lignes constatée par plusieurs études pourrait également être liée à d'autres facteurs dont la nature reste à déterminer ou encore à des co-expositions.

6.2 Autres cancers de l'enfant

Quelques études mentionnées plus haut portaient à la fois sur les leucémies de l'enfant et d'autres cancers de l'enfant (Kroll *et al.*, 2010, Bunch *et al.*, 2014, Bunch *et al.*, 2015, Pedersen *et al.*, 2015, Crespi *et al.*, 2016). Dans l'étude de Kroll *et al.*, 2010, il n'y avait d'excès de risque ni pour les tumeurs du système nerveux central ni pour les autres cancers, qui étaient tous de type différent, ne suggérant ainsi aucun lien réel. Dans les deux études réalisées en Angleterre par Bunch *et al.*, (2014 et 2015), une augmentation du risque a été mise en évidence pour les tumeurs du système nerveux central (ORa = 4,1 [1,1-4,7]), mais ce lien n'est significatif qu'entre 20 et 50 m et non pour une distance inférieure à 10 mètres. Cette absence de relation dose-effet selon la distance amène les auteurs à considérer que cet effet peut être dû au hasard ou à une autre raison. Au Danemark, l'étude de Pedersen *et al.*, (2015) montrait une diminution du risque dans le temps pour l'analyse combinée de tous les cancers de l'enfant, et une absence d'excès de risque statistiquement significatif pour les différents types de cancers étudiés séparément. Enfin, la récente étude californienne (Crespi 2016) rapportait une augmentation non significative du nombre de cas de tumeurs du SNC (ORa = 1,2 [0,4 - 3,4]) chez les enfants nés à moins de 50 m d'une ligne > 200 kV.

L'étude Setil a été conduite en Italie entre 1998 et 2001 sur l'association entre divers cancérigènes et l'incidence des neuroblastomes chez les enfants de moins de 10 ans (Parodi *et al.*, 2014). Les cas de neuroblastomes (n = 153) ont été recueillis dans les centres de traitement des cancers pédiatriques qui regroupent plus de 95 % des cas en Italie. Les témoins ont été tirés au sort dans la population générale et 1 044 sujets ont pu être inclus. La mesure des champs électromagnétiques basses fréquences a été réalisée pendant 48 h dans la chambre des enfants. Aucune association entre le risque de neuroblastome et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences n'a été mise en évidence dans cette étude. Néanmoins, dans la population de l'étude, très peu d'enfants avaient été exposés à un champ supérieur à 0,3 µT (seulement 2 cas et 19 témoins).

S'intéressant spécifiquement aux cancers du SNC chez l'enfant de moins de 15 ans, une analyse poolée de 10 études conduites entre 1979 et 2010 en Suède, au Royaume-Uni, en Finlande, aux États-Unis, au Japon, au Danemark et en Norvège a été publiée en 2010 (Kheifets *et al.*, 2010b). Les auteurs soulignaient l'absence de relation claire avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Quels que soient le type de mesure réalisée ou les ajustements effectués, aucune association significative n'a été mise en évidence (OR = 0,95 [0,65 - 1,41] ; 0,70 [0,40 - 1,22] et 1,14 [0,61 - 2,13]) pour des niveaux de champs magnétiques respectivement égaux à 0,1-0,2 µT ; 0,2-0,4 µT et ≥ 0,4 µT).

Tableau 14 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition de leucémie infantile (dans l'ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Kroll, <i>et al.</i> , 2010	Distance entre résidence à la naissance et les lignes Programme EM2D pour estimer les champs produits par les lignes	Enfants nés en Angleterre et Pays de Galles entre 1962 – 1995 28 968 cas issus du registre national des cancers de l'enfant 28 968 témoins issus du registre national des naissances	Densité de population, urbain/rural, niveau socio-économique, (indice de Carstairs)	Pour la leucémie, RR = 2,0 [0,18 - 22,04] non significatif car très peu de sujets exposés à un champ > 0,4 µT	Les résultats de cette étude peuvent aller dans le sens d'un lien entre champs électromagnétiques basses fréquences et leucémies de l'enfant. Mais cette étude n'explique pas à elle seule l'excès apparent de cas près des lignes.
Malagoli, <i>et al.</i> , 2010	Distance entre résidence au diagnostic et ligne HT (ARC-GIS) Évaluation du champs magnétique en fonction de la distance selon deux modèles CAMPI et EFC400	Enfants de moins de 13 ans 64 cas d'hémopathies issus du registre hospitalier des cancers de l'enfant. 256 témoins tirés au sort (bases municipales)	niveau socio-économique des parents	Pour toutes les hémopathies : augmentation non significative pour les champs > 0,4 µT : OR = 2,4 [0,4 - 15,0] Pour les leucémies aiguës : OR = 3,2 [0,4 - 23,4].	Les auteurs trouvent leurs résultats en cohérence avec les études précédentes rapportant un lien entre champs magnétiques et leucémie infantile.
Sermage-Faure, <i>et al.</i> , 2013 (Géocap)	Adresse au diagnostic. Géocodage précis puis distance entre résidence et ligne HT la plus proche.	2 779 cas de leucémies aiguës (Registre National des Cancers de l'Enfant). 30 000 témoins tirés au sort en population générale.	niveau socio-économique de la commune	Toutes lignes considérées OR = 1,2 [0,8 - 1,09] Lignes > 225 kV : OR = 1,7 [0,9 – 3,6]. Enfants de moins de 5 ans : OR = 2,6 [1,0 - 6,9] ; p-trend = 0,003 Association significative pour les communes moins urbaines (< 100 000 hab)	Le lien trouvé (OR = 2,6 pour LA chez les moins de 5 ans, habitant en zone peu urbaine) est à la limite de la significativité mais les analyses de sensibilité confortent ces résultats.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Bunch, <i>et al.</i> , 2014	Distance entre résidence à la naissance et les lignes (80 % des lignes 132 kV) Calcul à partir des caractéristiques des lignes	Enfants nés entre 1962 et 2008 au Royaume-Uni 53 515 cas de cancers issus du Registre national des cancers 66 204 témoins issus du registre national des naissances	niveau socio-économique (indice de Carstairs)	Pas d'effet sur l'ensemble de la période quel que soit le type de cancer. Pour la leucémie uniquement, mise en évidence d'un risque à moins de 600 m de la ligne sur la période 1962-1969 OR = 2,50 [1,10 – 5,68] mais pas après	L'association est retrouvée comme dans l'étude de Draper (2005) mais disparaît au cours du temps. Cette étude suggère que l'association observée serait due à un autre facteur.
Pedersen C, <i>et al.</i> , 2014b	Adresse à la naissance (géocodage).	1 698 cas de leucémies issus du registre des cancers danois. 3 396 témoins de population	niveau socio-économique de la commune	Pour les lignes : <ul style="list-style-type: none"> • 134 kV – 400 kV : OR = 0,76 [0,4 - 1,45] pour distance < 200m • 220 kV – 400 kV : OR = 1,76 [0,82 - 3,77] pour distance [200-599 m] Aucun cas ne vit à moins de 200 m d'une ligne THT	L'excès de risque constaté pour ligne THT dans la tranche 200 – 599 m est probablement lié au hasard → ne confirme pas les résultats de Draper en 2005
Pedersen <i>et al.</i> , 2015	Étude du sur-risque au cours du temps pour une exposition $\geq 0,4 \mu\text{T}$	1536 cas de leucémies aiguës issus du registre des cancers danois 2 témoins par cas	Radon, trafic routier, pollution de l'air, âge de la mère, ordre de naissance, caractéristiques socio-économique de la municipalité, urbanisation pour les leucémies	Période 1987-2003 RR = 0,80 [0,16 – 4,12] Période 1968-2003 RR = 1,67 [0,51 – 5,46]	Les auteurs ne peuvent confirmer leurs précédents résultats sur l'élévation du risque pour des expositions $> 0,4 \mu\text{T}$ Baisse importante du RR trouvé dans la période la plus récente.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Bunch, <i>et al.</i> , 2015	Distance aux câbles souterrains : à partir de la cartographie nationale du réseau souterrain, précisée avec Google street view si distance < 40 m, visites sur site, puis calcul du champ.	Enfants nés entre 1962 et 2008 au Royaume-Uni 17 211 cas de leucémies (+ 12 218 tumeurs cérébrales et 22 541 autres tumeurs) issus du Registre national des cancers 66 204 témoins issus du registre national des naissances	niveau socio-économique (indice de Carstairs)	Absence de lien avec les leucémies Élévation du risque pour tumeur du SNC uniquement chez les enfants habitant entre 10 et 50 m du câble souterrain (OR = 4,1 [1,1 - 4,7] entre 20 et 50 m).	L'absence de lien trouvé entre champs magnétiques et leucémies conforte l'hypothèse que le lien trouvé avec les lignes aériennes pourrait s'expliquer par d'autres facteurs
Kheifets, <i>et al.</i> , 2015 et Crespi <i>et al.</i> , 2016	Distance entre adresse de résidence à la naissance et ligne HT : - mesurée par GIS - vérifiée sur Google Earth si distance < 200m - complétée par visites sur site puis calcul du champ magnétique (> 200 m = 0 µT)	Enfants nés en Californie 6645 cas de leucémies issus du Registre national des cancers 5788 témoins issus du registre national des naissances	Origine ethnique (hispanique ou non), niveau socio-économique, poids de naissance, âge des parents, niveau d'étude, complications survenues lors de la grossesse et de l'accouchement, nombre de naissances vivantes et décédées	Pour distance > 50 m : OR = 1,4 [0,7 - 2,7] Pas d'augmentation pour les autres distances ni pour les lignes de plus faible voltage Analyses par sous-groupe : - LAL : OR = 1,3 [0,6 - 2,7] - < 5 ans : OR = 1,7 [0,8 - 3,7] - décade naissance 1996 – 2006 : OR = 1,9 [0,6 - 5,4] persistance des résultats avec les différentes analyses de sensibilité	L'association mise en évidence est plus faible que lors des études précédentes mais en accord avec d'autres études publiées et études poolées. Les résultats de Draper au-delà de 600 m ne sont pas retrouvés. Les résultats sont identiques selon que la référence soit > 600 m ou > 2000 m → soutien faible à un excès de leucémies de l'enfant à moins de 50 m des lignes HT (> 200 kV) et rien au-delà ni pour les lignes de voltage plus faible

Tableau 15 : Études explorant les facteurs de confusion entrant dans la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition de leucémie infantile (dans l'ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	Population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Swanson <i>et al.</i> , 2013	Distance entre l'adresse de résidence à la ligne la plus proche.	Échantillon de 9 639 adresses de la population du Royaume-Uni issues des listes électorales.	Aucun	la durée moyenne change selon la distance mais pas de corrélation linéaire → pas de preuve d'une plus grande mobilité près des lignes 0,21 % domiciliés à moins de 100 m des lignes.	Limites : seules les lignes 275-400 kV prises en compte. Exhaustivité pas totale du registre électoral. Profil différent selon urbain/rural → mais trop peu de rural.
Swanson <i>et al.</i> , 2014	la mesure de la charge en ion est dérivé d'un calcul à 4 paramètres (puissance, distance, direction du vent, force du vent).	Enfants nés au Royaume-Uni entre 1962 – 2008 53 515 cas issus du registre national des cancers. 66 204 témoins.		RR = 14,00 [1,84 –106,46] pour la plus haute exposition en ions corona, pour les périodes plus anciennes (1960) mais pas de tendance et lien plus faible qu'avec la distance seule, sauf pour les plus exposés de la première période.	L'hypothèse ion-corona explique moins bien le lien avec les leucémies que la distance seule → n'explique donc pas le lien mais nécessite d'améliorer le modèle.
Slusky, <i>et al.</i> , 2014	Distance entre adresse à la naissance et ligne HT mesuré par GIS <i>wire-code</i> méthode déterminé à l'aveugle du statut cas-témoin.	Enfants < 8 ans Sous-ensemble de l'étude cas-témoins sur les Leucémies de l'enfant en Californie du Nord 707 cas de LA, dont 310 cas participants. 4 témoins par cas.	corrélations entre caractéristiques socio-démographiques et codes de câblage.	<ul style="list-style-type: none"> témoins participants sont de SES plus élevé, niveau d'étude plus élevé code de câblage lié au niveau SES : SES bas associé à WC élevé association faible entre WC et LA, non modifiée par analyse multivariée OR non homogène selon les différents groupes de témoins : OR = 1,18 avec témoins idéaux / 1,43 avec témoins 1er choix 	Analyse la plus robuste avec cas et témoins idéaux : pas de lien Analyse des différents groupes : peu de différence → peu d'impact de la participation car la procédure de choix des témoins, tirés au sort sur liste naissance, correcte

Étude	Caractérisation de l'exposition	Population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Pedersen, <i>et al.</i> , 2014a	Adresse à la naissance obtenue par le registre d'état civil Coordonnées géographiques (point à la porte d'entrée) par liaison avec la base d'adresse danoise. Distance calculée par ArcGIS 9.3	1 024 cas de leucémies issus du registre des cancers danois. 2 048 témoins de population appariés	Radon : estimation basée sur un modèle antérieur (fait pour 94,5 % des adresses). Pollution de l'air : ensemble des oxydes de nitrogènes estimé par un modèle (fait pour 95,8 % des adresses). Autres : niveau socio-économique (commune), âge maternel, rang de naissance (fichier état civil).	OR = 1,68 [0,72 - 3,92] pour enfants habitant [0 – 199 m], radon > 42 : non significatif Pas d'interaction entre pollution de l'air et proximité des LHT Interaction significative entre concentration en radon et proximité des lignes : enfants habitant [0-199m] et radon à 42 Bq/m3 OR = 2,88 [1,01-8,27] Les analyses de sensibilité effacent l'effet.	Pas d'association significative avec la distance aux lignes. Les résultats soulèvent plusieurs hypothèses : <ul style="list-style-type: none"> ions émis par les lignes se chargent plus en radon, mais l'effet serait plutôt attendu à l'extérieur alors que le radon se concentre à l'intérieur des logements. l'exposition aux champs rendrait l'enfant plus vulnérable au radon - interaction peut-être due au hasard ou si l'effet réel, le risque faible.

Tableau 16 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par des mesures de champs) et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	Population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Wünsch-Filho, 2011	Mesure par Emdex-II dosimètre pdt 3 mn devant la porte de la maison et dans chaque pièce. Puis dosimètre laissé 24h sous le lit de l'enfant.	248 cas de LA provenant de 8 hôpitaux brésiliens (162 cas inclus) 565 témoins appariés sur sexe, âge, ville de naissance.	âge, sexe, origine ethnique, mobilité, scolarisé au moment de l'interview + examen de : Sd de Down, ATCD d'infection influenza, ATCD de la mère: travail dans l'agriculture, alcool, tabac.	Pas d'augmentation du risque chez les sujets exposés à plus de 0,3 μ T (11 cas et 34 témoins) Risque plus élevé pour la nuit (NS) Risque accru mais NS pour sujets vivant à moins de 100 m des lignes et entre 100 et 200 m. Risque encore plus grand quand restriction aux lignes de 88 kV (majorité) or les champs émis sont très faibles.	Observation d'un risque accru dans les catégories intermédiaires. Nombreux biais potentiels Aucune association significative Résultats inconstants et imprécis
Does, 2011	Mesures de champ magnétique dans les habitations, au printemps, en été et en début d'automne.	245 cas de leucémies domiciliés dans un des 35 comtés de Californie 269 témoins <i>Sous-groupe de la Northern California Childhood Leukemia Study</i>	Revenu, âge, sexe, ethnie, ethnie de la mère	Pas d'association entre contact indoor et risque de leucémie	<ul style="list-style-type: none"> aucune indication d'une association entre la leucémie infantile et l'exposition aux courants de contact ou champs magnétiques. faible association entre les mesures de courants de contact et les champs magnétiques.

Étude	Caractérisation de l'exposition	Population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs <i>(se référer au texte pour les commentaires)</i>
Salvan, 2015	Mesures dans la chambre de l'enfant (Emdex II ou Emdex Lite). Mesures de 24-48 h, de nuit, et le week-end.	enfants < 10 ans 745 cas de leucémies provenant de 14 régions d'Italie (683 interviewés et 609 avec mesures) 1475 témoins de population appariés sur l'âge (1044 interviewés et 904 avec mesures).	âge, sexe, niveau d'éducation des parents ; habitation pour les éligibles 92 %.	Aucune association entre LA et BF si variable continue. Si on utilise variable en catégorie, risque accrue pour la catégorie intermédiaire (0,1 μ T - 0,2 μ T). Les résultats confinés aux mesures nocturnes confirment les autres (avec diminution des effets).	Pas d'association avec mesure continue. Absence de relation dose effet en analyse catégorielle.

Tableau 17 : Analyses poolées investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	résultats	conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Kheifets <i>et al.</i> , 2010a	Mesures à la maison (diagnostic ou naissance). Utilisation mesure au diagnostic si disponible. Utilisation de la moyenne géométrique pour l'analyse.	Enfants < 15 ans Brazil, Germany, Italie, Japan, Tasmanie, UK UK représente 89 % des cas et 75 % des témoins mais plus forte proportion de sujets exposés dans l'étude brésilienne → plus d'impact.	âge, sexe, étude mobilité, SES.	Globalement : le risque augmente avec l'augmentation de l'exposition. Fort impact de l'étude brésilienne (grand nombre d'exposés) sans le Brésil : OR = 1,56 [0,8 - 3,1] proche de OR d'Ahlbom (1,68). avec cutt-off à 0,4 : OR=2,02 [0,87 – 4,69]. avec la distance : OR (≤ 50m) =1,59 [1,0 - 2,5].	confirme les résultats des analyses poolées précédentes avec association plus faible confirme que la distance seule est un estimateur de l'exposition insuffisant.
Zhao <i>et al.</i> , 2014a	Différente selon les études.	9 études cas-témoins provenant d'Allemagne, Canada, Japon, Nouvelle Zélande, Royaume-Uni, Italie.	âge, sexe, statut socioéconomique au minimum.	Pas d'association en dessous de 0,4 µT. Au-dessus de 0,4µT, augmentation du risque pour les Leucémie ORa = 1,57 (1,03 – 2,40) et pour les LAL ORa=2.43 (1,30 – 4,55) Au-dessus de 0,3 µT, association proche de la significative ORa = 1,44 (0,99 - 2,10) pour les leucémies Au seuil de 0,2 µT, association significative ORa = 1,31 (1,06 – 1,61) pour les leucémies	Association significative au-dessus du seuil de 0,2 µT
Leitgeb <i>et al.</i> , 2014		Analyse poolée. Études réalisées à partir de 1979.		Plus le nombre de cas exposés est élevé, plus l'OR se rapproche de 1 (pour les études sur les leucémies ou sur les autres cancers).	Pas d'association avec les cancers de l'enfant ni pour les autres cancers. Pas de lien de causalité

Tableau 18 : Études investiguant la relation entre l'exposition professionnelle des parents aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de leucémie infantile (par ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	résultats	conclusion des auteurs
Hug <i>et al.</i> , 2010	Questionnaire et interview téléphonique des deux parents séparément. Les emplois sont assignés à des catégories d'expositions grâce à une matrice d'exposition.	2 049 cas (dont 846 leucémies) issus du registre national allemand 2392 témoins issus de la population générale	niveau social et urbain, âge, tabac, ordre de naissance.	<ul style="list-style-type: none"> profession du père > 0,2 μT ORa = 0,85 [0,70 – 1,03] pour les leucémies. Pour > 1 μT, pas d'augmentation significative profession de la mère ; pas d'association 	<p>Pas d'association entre un profession des parents liée aux CEM et risque de leucémie de l'enfant.</p> <p>Une méta-analyse supplémentaire soulève le problème du biais de publication (Egger's test= 0,007) et la grande hétérogénéité des résultats.</p>
Reid <i>et al.</i> , 2011	Profession des parents questionnaire sur exposition professionnelle si métier « à risque » interview téléphonique analyse par expert.	519 cas issus de 10 centres d'oncologie pédiatriques d'Australie (416 inclus) 3 témoins par cas appariés.	âge, SES, alcool, tabac, âge de la mère	<p>Pas d'association pour les mères exposés à un niveau modéré ou fort OR= 0.96 (0.74 – 1,25) Très légère augmentation , toujours NS, pour les jobs avant 2 ans et 1 an avant la naissance de l'enfant</p>	<p>Pas d'association entre expo professionnelle des parents et risque de leucémie de l'enfant</p>
Keegan <i>et al.</i> , 2012	Profession du père à la naissance Codage par dire d'expert.	17 793 cas issus du registre national des cancers d'Angleterre 16 764 témoins issus du registre des naissances, appariés sur sexe, âge, district.	Niveau social	<p>Pas d'association entre association entre parents travaillant sur les EMF et risque de leucémie 1,09 (0,99 – 1,20) ; réduit légèrement après ajustement sur le niveau social 1,08 (0,98 -1,19)</p> <p>Augmentation significative du risque pour les "autres leucémies", OR = 1,64 (1,14 – 2,38) significatif après ajustement</p>	<p>Augmentation du risque des « autres leucémies ».</p>

Tableau 19 : Études investiguant la relation entre l'exposition des enfants aux champs électromagnétiques basses fréquences (estimée par la distance aux lignes HT/THT) et l'apparition des autres cancers de l'enfant (par ordre chronologique).

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	résultats	conclusion des auteurs
Kroll, <i>et al.</i> , 2010	Distance entre résidence à la naissance et les lignes. Programme EM2D pour estimer les champs produits par les lignes.	Enfants nés en Angleterre et Pays de Galles entre 1962 – 1995 <ul style="list-style-type: none"> 28 968 cas issus du registre national des cancers de l'enfant. 28 968 témoins issus du registre national des naissances 	Densité de population, urbain/rural, niveau socio-économique, (indice de Carstairs)	Pour tumeurs du SNC, OR = 0,30 [0,03 – 3,20] Pour autres cancers, OR = 5,0 [0,58 - 42,80] Très peu de sujets exposés à un champ > 0,4 µT	Pas d'association avec les cancers de l'enfant
Bunch, <i>et al.</i> , 2014	Distance entre résidence à la naissance et les lignes (80 % des lignes 132 kV) Calcul à partir des caractéristiques des lignes	Enfants nés entre 1962 et 2008 au Royaume-Uni <ul style="list-style-type: none"> 53 515 cas de cancers issus du Registre national des cancers 66 204 témoins issus du registre national des naissances 	niveau socio-économique (indice de Carstairs)	Pas d'effet sur l'ensemble de la période quel que soit le type de cancer.	Pas d'association avec les cancers de l'enfant
Bunch, <i>et al.</i> , 2015	Distance aux câbles souterrains : à partir de la cartographie nationale du réseau souterrain, <ul style="list-style-type: none"> précisée avec Google street view si distance < 40 m visites sur site, puis calcul du champ. 	Enfants nés entre 1962 et 2008 au Royaume-Uni <ul style="list-style-type: none"> 17 211 cas de leucémies (+ 12 218 tumeurs cérébrales et 22 541 autres tumeurs) issus du Registre national des cancers 66 204 témoins issus du registre national des naissances 	niveau socio-économique (indice de Carstairs)	Élévation du risque pour tumeur du SNC uniquement chez les enfants habitant entre 20 et 50 m du câble souterrain : OR = 4,12 [1,10 – 15,58].	

Étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée	Facteurs de confusions pris en compte	résultats	conclusion des auteurs
Kheifets, <i>et al.</i> , 2015 et Crespi <i>et al.</i> , 2016	Distance entre adresse de résidence à la naissance et ligne HT : Mesurée par GIS. Vérifiée sur Google Earth si distance < 200 m. Complétée par visites sur site. Puis calcul du champ magnétique (> 200 m = 0 µT)	Enfants nés en Californie 3 308 cas de tumeurs du SNC issus du Registre national des cancers 3 308 témoins issus du registre national des naissances	Origine ethnique (hispanique ou non), niveau socio-économique, poids de naissance, âge des parents, niveau d'étude, complications survenues lors de la grossesse et de l'accouchement, nombre de naissances vivantes et décédées	Pour distance > 50 m des lignes > 200 kV : OR = 1,42 [0,4- 3.4]	Pas d'association avec les tumeurs du SNC
Parodi <i>et al.</i> , 2014	Mesures dans la chambre de l'enfant (EMDEX ou Lite) mesures de 48h, mesures de nuit, week-end.	Enfants < 10 ans provenant de 14 régions d'Italie 153 cas de neuroblastomes (134 avec mesures) 1 044 témoins (904 avec mesures)	Age, sexe, niveau d'étude des parents.	aucune association entre ELF et neuroblastome mais la plupart des enfants sont très peu exposés (< 1 µT) seulement 2 cas et 19 témoins exposés à plus de 0,3 µT	L'étude ne supporte pas le rôle de l'exposition aux champs dans la survenue de NB chez l'enfant, au moins au niveau d'exposition habituellement rencontré dans les logements italiens.
Kheifets <i>et al.</i> , 2010b (étude poolée)	Mesures à la maison (diagnostic ou naissance) <ul style="list-style-type: none"> utilisation mesure au diagnostic si disponible utilisation de la moyenne géométrique pour l'analyse. 	enfants < 15 ans Allemagne, Brésil, Italie, Japon, Royaume-Uni, Tasmanie, Royaume-Uni représente 89 % des cas et 75 % des témoins mais plus forte proportion de sujets exposés dans l'étude au Brésil → plus d'impact	âge, sexe, étude mobilité, SES.	OR (> 0,4 µT) : 1,14 [0,61 – 2,13] Analyses complémentaires : aucun effet.	Pas d'indication d'une association entre exposition aux champs électromagnétiques de basses fréquences et les tumeurs cérébrales infantiles.

6.3 Cancers de l'adulte

Les études portant sur les cancers de l'adulte sont plus rares que pour les leucémies infantiles et concernent principalement les cancers du sein, du SNC et les hémopathies malignes. Une des limites majeures des études épidémiologiques de cohorte, est que la période de latence entre l'exposition au cancérigène et l'éventuelle apparition d'un cancer est inconnue. Cette limite, qui dans le cadre des cancers de l'enfant est minorée, est particulièrement importante pour l'étude des cancers de l'adulte.

Concernant les cancers de l'adulte, la question de l'exposition professionnelle est, bien entendu, particulièrement prégnante du fait des niveaux d'exposition parfois très élevés pour certaines catégories de travailleurs comparativement à ceux mesurés en expositions résidentielles.

6.3.1 Cancer du sein

Les études concernant les cancers du sein sont les plus nombreuses, en raison d'une part de la très forte incidence du cancer du sein en général, et d'autre part de l'hypothèse selon laquelle les champs électromagnétiques basses fréquences diminueraient la production nocturne de mélatonine (cf. paragraphe 7.2.5 sur « l'hypothèse mélatonine »), entraînant ainsi une augmentation de risque de cancer du sein en agissant sur la régulation hormonale par le biais de l'axe hypothalamo-hypophysaire. Une vingtaine d'études ont été conduites depuis la fin des années 70 sur l'association entre champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de cancer du sein, études qui ont fait l'objet de deux méta-analyses publiées en 2010 et 2013.

À la suite d'une méta-analyse publiée en 2001 (Erren 2001) évoquant un sur-risque chez les femmes (OR = 1,12 (1,09 – 1,15)) et chez les hommes (OR = 1,37 (1,11 – 1,71)), une nouvelle méta-analyse a inclus 15 études cas-témoins portant sur l'association entre les cas de cancers du sein (chez la femme) et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences publiées entre 2000 et 2009 (Chen *et al.*, 2010). Les résultats ne montrent pas d'association significative entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de cancer du sein chez la femme pour l'ensemble des études : OR = 0,99 (0,90 – 1,09), ni dans les sous-groupes analysés selon le mode d'exposition (résidentielles ou professionnelles), le statut ménopausique et le statut des récepteurs aux œstrogènes. Il convient de souligner l'hétérogénéité des études incluses dans cette méta-analyse, tant sur la sélection des cas et des témoins, que sur la mesure de l'exposition et la prise en compte du type d'exposition (résidentielle ou professionnelle). Au total, cette étude n'a mis en évidence aucune association (globale ou par sous-groupe) entre une sur-incidence de cancers du sein et une exposition aux champs électromagnétiques de basses fréquences.

Une autre méta-analyse incluant les mêmes études a été conduite (Zhao *et al.*, 2014b). Néanmoins, plusieurs erreurs et/ou incohérences figurent dans ce travail : les études incluses dans cette méta-analyse ne correspondent pas aux bornes temporelles de leur équation de recherche, le nombre d'articles pris en compte dans l'analyse est fluctuant, sans fondement rigoureux. En conséquence, les résultats de cette étude ne seront pas abordés dans ce rapport.

Une autre méta-analyse (Chen *et al.*, 2013) incluant des études sur une période plus longue (1990-2012) et, en conséquence, plus d'études (23 études cas-témoins) a également analysé l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le risque de cancer du sein (uniquement chez la femme). La méthodologie de cette étude pose néanmoins problème. Premièrement, les résultats individuels rapportés pour chaque étude sont différents de ceux rapportés dans les publications sources (et donc différents de ceux rapportés par Chen *et al.* 2010 pour les études communes). Ensuite, la méthode utilise un score de qualité des études dans le modèle d'analyse. S'il peut être tout à fait pertinent de vouloir évaluer la qualité des études incluses dans la méta-analyse, la prise en compte d'un score de qualité dans l'analyse elle-même est fortement critiquée car source de biais (Greenland 2001, Jüni *et al.*, 1999). Il aurait été préférable de tenir compte de ce score de qualité en faisant une analyse de sensibilité, incluant ou

non certaines études dans l'analyse en fonction de leur qualité. Ainsi, les résultats de cette méta-analyse dont la méthodologie n'est pas valide n'ont pas été retenus par le groupe de travail.

Une étude de grande envergure concernant l'association entre champs électromagnétiques basses fréquences et cancers de l'adulte a été conduite en Angleterre et au pays de Galles (Elliott *et al.*, 2013). Cette étude cas-témoins a inclus les cas de cancers enregistrés par le registre national des cancers entre 1974 et 2008, chez les personnes vivant à moins de 1 000 m d'une ligne > 275 kV. Ils ont comparé 29 202 cas de cancers du sein chez la femme, 7 823 cas de leucémies, 6 781 cas de cancers du système nerveux central et 9 153 cas de mélanomes (N = 9 153) avec 79 507 témoins constitués par les autres cancers (cas de cancers non considérés dans la littérature comme étant associés aux champs électromagnétiques basses fréquences). L'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences a été estimée par une modélisation reposant sur la distance séparant le domicile lors du diagnostic, de la ligne > 275 kV la plus proche, la charge historique de la ligne, la configuration des lignes. Après ajustement sur différents facteurs de confusion (âge, sexe, année de diagnostic, niveau de défavorisation), aucun excès de risque n'était significatif, et ceci quel que soit le niveau d'exposition ou la localisation cancéreuse étudiée. Cette étude de population portant sur des effectifs élevés et tenant compte du niveau social (facteur important, car les cancers étudiés sont plutôt liés à un niveau socio-économique élevé) ne retrouve pas de sur-incidence à proximité des lignes pour les 4 localisations cancéreuses. Soulignons cependant que le groupe témoin étant constitué d'autres cancers, les auteurs font l'hypothèse qu'aucun de ces autres cancers n'est lié aux champs électromagnétiques basses fréquences. Par ailleurs, comme dans beaucoup d'études basées sur les registres, l'histoire résidentielle n'a pas été prise en compte et il existe des incertitudes dans l'estimation des champs qui repose sur des données historiques.

Au sein d'une cohorte de près de 270 000 ouvrières de 503 usines de textile en Chine, une étude cas-témoins nichée dans la cohorte a été conduite sur 1 709 cas de femmes atteintes d'un cancer du sein et 4 780 témoins (Li *et al.* 2013). L'exposition a été appréciée grâce à l'utilisation d'une matrice emploi-exposition développée spécifiquement pour l'étude, prenant en compte l'histoire professionnelle complète des ouvrières. Les ratios de risque ont été estimés en fonction de l'exposition cumulée au cours de toutes les années de travail des femmes. Dans cette étude, les auteurs ne rapportaient aucun sur-risque de cancer du sein ($HR^{52} = 1,03 [0,87 - 1,21]$) pour les catégories les plus exposées *versus* les moins exposées. L'utilisation conjointe d'une cohorte de grande taille, couplée à l'utilisation d'une matrice emploi-exposition, à la vérification des niveaux d'exposition par des mesures individuelles et à la vérification de l'ensemble des cas grâce à l'utilisation d'un registre de cancers permet d'obtenir un très bon niveau de preuve dans cette étude.

Une grande étude de cohorte menée aux Pays-Bas (Koeman *et al.* 2014) a suivi plus de 120 000 sujets âgés de 55 à 69 ans au moment de l'inclusion en 1986. Cette étude a cherché à apprécier la relation entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'incidence du cancer du sein en portant une attention particulière à la durée de l'exposition. Concernant l'incidence des cancers du sein chez les femmes ménopausées, les résultats de l'étude ne montraient pas de lien, ni avec le fait d'avoir déjà été exposé (faible exposition $HR = 1,07 [0,94 - 1,23]$, forte exposition $HR = 1,27 [0,59 - 2,58]$), ni avec la dose cumulée ($p = 0,88$), ni avec la durée de l'exposition ($HR/10 \text{ ans} = 0,96 (0,85 - 1,08)$). Les résultats de cette étude, fondée sur une observation de plus de 17 ans et ayant observé des paramètres importants tels que la dose cumulée ou la durée d'exposition, ne sont pas en faveur d'un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et la sur-incidence des cancers du sein chez les femmes ménopausées.

⁵² Le *hazard ratio* (HR) est le rapport des incidences instantanées. Lorsque la maladie est rare, il est proche du risque relatif (Labreuche 2011).

6.3.2 Cancers du système nerveux central

Une étude cas-témoins, menée en Gironde entre mai 1999 et avril 2001, a inclus 221 patients présentant une tumeur du système nerveux central (105 gliomes, 67 méningiomes, 33 neurinomes et 16 autres) et 442 témoins individuellement appariés selon l'âge et le sexe, sélectionnés parmi la population générale (Baldi *et al.*, 2011). Il est néanmoins à noter que 30 % des cas identifiés ont refusé de participer à l'étude. L'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et aux radiofréquences a été évaluée en milieu professionnel à l'aide d'une évaluation réalisée par un expert, en se fondant sur le planning complet de travail et sur une matrice emploi-exposition publiée en Suède. Les résultats concernant les radiofréquences ne seront pas détaillés dans ce rapport. L'exposition environnementale a été appréciée en évaluant la distance de l'adresse au diagnostic par rapport aux lignes électriques à l'aide d'un système d'information géographique. Des facteurs de confusion tels que l'éducation, l'utilisation de pesticides à domicile, la résidence dans une zone rurale et l'exposition professionnelle aux produits chimiques ont été pris en compte. Des analyses distinctes ont été réalisées pour les gliomes, les méningiomes et les neurinomes de l'acoustique. Concernant l'ensemble des tumeurs cérébrales, une augmentation du risque proche du seuil de significativité a été trouvée pour l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences : OR = 1,59 [0,97 - 2,61], mais aucune tendance linéaire n'a pu être mise en évidence. Cette augmentation était significative pour les méningiomes (OR = 3,02 [1,10 - 8,25]). Le risque de méningiome était également plus élevé chez les sujets vivant au voisinage des lignes à haute tension (< 100 m), même si la différence n'était pas significative : OR = 2,99 [0,86 - 10,40]. Ces données suggèrent que l'exposition professionnelle pourrait jouer un rôle dans le développement des méningiomes. Toutefois, concernant l'exposition liée aux lignes à haute-tension, l'étendue de l'intervalle de confiance et l'absence de prise en compte de la puissance de la ligne ne permettent pas de conclure à un lien entre une exposition résidentielle et un sur-risque de méningiome.

L'étude de Koeman *et al.* (2014) (*cf.* 6.3.1) dont la méthodologie était particulièrement soignée, n'a retrouvé aucun lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de tumeur cérébrale chez les hommes ou chez les femmes, quel que soit le critère pris en compte (exposition, exposition cumulée, durée d'exposition). Néanmoins, contrairement à l'étude précédente, les résultats par sous-type histologique n'ont pas été publiés.

L'étude d'Elliott *et al.* (2013) (*cf.* 6.3.1) a également investigué la question de l'influence des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence des cancers du SNC (N = 6 781). Aucune association n'a été mise en évidence entre la distance à une ligne > 275 kV la plus proche et une sur-incidence des cancers du SNC.

Basée sur l'étude Interphone portant sur le lien entre l'utilisation du téléphone mobile et les tumeurs cérébrales, l'étude Interocc a analysé les données d'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences d'après un recueil détaillé de l'histoire professionnelle et l'utilisation d'une matrice emploi-exposition (Turner *et al.*, 2014). Sept pays ont participé à cette étude (Allemagne, Australie, Canada, France, Israël, Nouvelle Zélande et Royaume-Uni) entre 2000 et 2004 et ont inclus 3 761 cas de tumeurs cérébrales (1 939 cas de gliomes et 1 822 cas de méningiomes) et 5 404 témoins. Des estimations de l'exposition cumulée, de l'exposition moyenne, de l'exposition maximale et de la durée d'exposition ont été calculées pour toute la durée de la vie, et entre 1 et 4 ans, 5 et 9 ans et plus de 10 ans avant le diagnostic (date de référence). Aucune association entre l'exposition cumulée aux champs électromagnétiques basses fréquences tout au long de la vie et le risque de gliome et de méningiome n'a été relevée. En revanche, une association a été trouvée entre l'exposition cumulée aux champs électromagnétiques basses fréquences dans le passé récent (entre 1 et 4 ans avant le diagnostic) et le gliome : OR = 1,67 (1,36 - 2,07) et une association plus faible à la limite de la significativité avec le méningiome : OR = 1,23 (0,97 - 1,57) pour les catégories d'exposition cumulée les plus importantes. Il est important de noter que cette relation était linéairement significative (p-trend < 0,001 et p-trend = 0,02). Ce résultat, retrouvé par d'autres études antérieures, serait en faveur d'un rôle promoteur des champs électromagnétiques basses

fréquences sur le risque de tumeur cérébrale. Néanmoins, un biais de sélection (lié à l'absence de recrutement des cas *via* un registre de population), et un biais de mémorisation (incertitude du souvenir de l'exposition) restent possibles.

Une grande étude de cohorte a été menée en Grande Bretagne parmi les employés de la *Central Electricity Generating Board* entre 1973 et 2010 (Sorahan 2014a). L'analyse a porté sur les 73 051 travailleurs embauchés au cours de la période 1952 - 1982 ayant travaillé au moins 6 mois au cours de la période 1973 - 1982, avec des données détaillées sur les postes occupés entre 1971 et 1993. Trois-cent-soixante-douze cas de tumeurs cérébrales ont été répertoriés *via* les registres de cancers ou les certificats de décès. Des calculs détaillés ont été réalisés afin de permettre une évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, selon différents indicateurs (exposition cumulée sur toute la vie, exposition récente (au cours des 10 dernières années), exposition lointaine (avant les 10 dernières années). La régression de Poisson a été utilisée pour calculer les risques relatifs de développer une tumeur cérébrale primitive notifiée par le registre des cancers ou par la cause de décès, selon l'exposition tout au long de la vie, l'exposition passée (≥ 10 ans) ou l'exposition récente (≤ 10 ans). Aucune association n'a été trouvée pour l'ensemble des tumeurs cérébrales, les gliomes ou les méningiomes, quel que soit l'indice d'exposition utilisé, ni en prenant en compte des facteurs de confusion. Le risque relatif estimé pour l'exposition récente (≤ 10 ans) était lui aussi proche de 1, ce qui contraste avec les résultats de l'étude Interocc (Turner 2014). Les auteurs observent un risque accru de méningiome bien que non significatif pour les catégories d'exposition cumulée les plus élevées (plus de 5 μ T-années), mais il n'y avait pas d'effet dose-réponse (risque plus élevé dans la catégorie d'exposition intermédiaire). En outre, la comparaison avec les données nationales d'incidence des méningiomes dans les différentes catégories d'exposition ne montre pas d'excès de risque significatif. Ces éléments ne confortent pas l'hypothèse d'une causalité de cette observation.

6.3.3 Hémopathies malignes

Une étude cas-témoins à partir des certificats de décès a été conduite dans la région de Sao Paulo au Brésil (Marcilio *et al.*, 2011). L'analyse a inclus 1 857 cas de leucémie, 2 357 cas de tumeurs du cerveau, 367 cas de sclérose latérale amyotrophique, et 4 706 témoins constitués de décès d'autres causes (excepté celles suspectées comme liées aux champs électromagnétiques⁵³). Le risque de décès par leucémie était à la limite du seuil de significativité pour les personnes vivant à moins de 50 m des lignes : OR = 1,47 (0,99 – 2,18) par rapport à ceux vivant à plus de 400 m (référence). De manière similaire, une augmentation de la mortalité par leucémie, non statistiquement significative, a été observée chez les adultes vivant dans les maisons où les champs magnétiques calculés étaient les plus élevés : OR = 1,61 (0,91 - 2,86) pour les adultes exposés à des champs de plus de 0,3 μ T. Aucune augmentation n'a été relevée pour les tumeurs cérébrales ou la sclérose latérale amyotrophique. Ces résultats suggèrent un risque accru de décès par leucémie chez les adultes vivant à proximité des lignes à haute tension, et chez les personnes vivant dans des maisons où le champ magnétique calculé est élevé, bien que le risque soit limité pour les lignes basses tensions. La fiabilité de cette étude est néanmoins limitée, car le recrutement des cas et des témoins est basé sur les certificats de décès dont la cause n'est souvent pas codée de manière fiable. De plus, étant donné qu'une partie non négligeable des patients atteints d'une leucémie ne décède pas de cette pathologie, l'étude réalisée à partir de données de mortalité sélectionne les cas graves, non représentatifs de la totalité des cas, ce qui peut occasionner un biais de sélection.

⁵³ Les pathologies exclues, car considérées par les auteurs potentiellement liées à l'exposition aux champs électromagnétiques, sont le cancer du sein, de la prostate et des ovaires, les lymphomes, les maladies neurodégénératives, les suicides, les maladies ischémiques cardiaques, les arythmies et les maladies vasculaires cérébrales.

L'étude de cohorte néerlandaise (Koeman *et al.*, 2014, *cf.* 6.3.1) portant sur plus de 120 000 sujets âgés de 55 à 69 ans s'est également intéressée au risque d'hémopathies. Une association significative a été retrouvée pour les hommes ayant un emploi les exposant plus fortement aux champs électromagnétiques basses fréquences⁵⁴ avec la leucémie myéloïde aiguë : OR = 2,15 (1,06 - 4,35) et les lymphomes folliculaires : OR = 2,78 (1,00 - 5,77). Concernant les lymphomes folliculaires, il existait une tendance linéaire significative avec la dose cumulée ($p = 0,03$). Le lien avec les LAM a déjà été rapporté antérieurement (Kheifets 2008) et mérite d'être approfondi. Le lien avec le lymphome folliculaire est plus sujet à caution, dans la mesure où il n'a jamais été retrouvé par d'autres études. Par ailleurs, les nombreux changements intervenus dans la classification des lymphomes au cours de ces dernières années en compliquent également l'interprétation.

L'étude de cohorte réalisée en Grande-Bretagne (Sorahan 2014b) s'est également intéressée aux hémopathies et ne retrouve aucun lien avec les différents types de leucémies, à l'exception de la LAL, mais ces observations reposent sur un très faible nombre de cas et ne sont pas confirmées par les données nationales d'incidence et de mortalité par leucémie (SMR < 1).

L'étude d'Elliott *et al.* (2013) (*cf.* 6.3.1) a également investigué la question de l'influence des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence des leucémies (N = 7 823). Aucune association significative entre la distance à une ligne > 275 kV la plus proche et une sur-incidence des cancers hématologiques n'a été mise en évidence.

Enfin, une étude cas-témoins nichée dans la cohorte Nocca (*Nordic Occupational Cancer Cohort*), incluant près de 15 millions d'adultes des pays nordiques, a inclus 5 409 adultes atteints de LAM entre 1961 et 2005 et 27 045 témoins appariés selon l'âge, le sexe et le pays (Talibov *et al.*, 2015). L'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de chocs électriques ont été assignés aux emplois déclarés dans le recensement à l'aide d'une matrice emploi-exposition. Les ratios de risque et intervalles de confiance à 95 % ont été estimés à l'aide d'une régression logistique conditionnelle ajustée pour d'autres expositions professionnelles possiblement liées au risque de LAM (par exemple, le benzène et les radiations ionisantes). Environ 40 % des travailleurs étaient professionnellement exposés à des niveaux faibles et 7 % à des niveaux élevés de champs électromagnétiques basses fréquences. Concernant les chocs électriques, 18 % des travailleurs étaient à risque faible et 15 % à risque élevé. Les auteurs n'ont pas observé d'association entre l'exposition professionnelle et la LAM, ni pour les champs électromagnétiques basses fréquences, ni pour les chocs électriques. Le ratio de risque était de 0,88 (0,77 - 1,01) pour les travailleurs exposés à des niveaux élevés de champs électromagnétiques basses fréquences, et 0,94 (0,85 - 1,05) pour les travailleurs à haut risque de chocs électriques, en comparaison aux travailleurs faiblement exposés. Les analyses conduites sur les doses cumulées étaient non significatives. Ces résultats ne supportent pas l'hypothèse d'une association entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et aux chocs électriques et la LAM.

6.3.4 Autres cancers

Les cancers autres que les cancers du sein, du SNC ou hématologiques ont été peu étudiés. L'étude de Koeman *et al.* s'est également intéressée au cancer du poumon mais plutôt dans le cadre d'une analyse de sensibilité (Koeman *et al.*, 2014). En effet, la relation entre les champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition d'un cancer du poumon paraissant peu crédible, l'intérêt porté par cette étude au cancer du poumon est en réalité pour s'assurer que l'étude ne comporte pas de biais méthodologique (mauvais ajustement sur la consommation de tabac, biais de sélection de la population) et valider les résultats obtenus sur les autres types de cancers (sein, tumeurs du SNC, hémopathies). Aucune association n'a été mise en évidence entre

⁵⁴ Selon la matrice emploi-exposition de Bowman 2007.

les champs électromagnétiques basses fréquences et l'incidence des cancers du poumon dans cette étude.

Concernant les mélanomes, si l'étude d'Elliott n'a rapporté aucune association significative (Elliott *et al.*, 2013) concernant les mélanomes malins de la peau, une étude cas-témoins conduite dans 9 pays européens a investigué l'association entre une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'incidence d'un mélanome uvéal (tumeur rare de l'œil) entre 1994 et 1997 (N = 323) (Behrens *et al.*, 2010). Cette étude rapportait une augmentation importante de la fréquence de cette tumeur rare chez les femmes travaillant sur les installations de transport d'électricité (ORa = 5,81 [1,72 - 19,66]), cette relation étant non significative chez les hommes. Pour ces derniers, seul le fait de travailler dans un poste de transformation était significativement associé à une augmentation du risque (ORa = 2,14 [1,06 - 4,32]). Le mode de recueil des données par questionnaire et l'absence de certains facteurs de confusion (comme l'exposition solaire) nous conduisent à penser que ce sujet doit faire l'objet de nouvelles études ou d'une étude poolée afin de confirmer ou d'infirmier ce résultat.

Une étude s'est intéressée à l'utilisation des couvertures chauffantes comme facteur de risque des cancers de la thyroïde (un cancer hormono-dépendant comme le cancer du sein) (Kato *et al.*, 2015). Au sein de la cohorte « *Women Health Initiative* », une cohorte de femmes américaines âgées de 50 à 79 ans, 190 cancers de la thyroïde ont été identifiés. Cette étude n'a pas rapporté de lien entre l'apparition d'un cancer de la thyroïde et l'utilisation d'une couverture chauffante (HR = 0,98 [0,72 - 1,32])

Tableau 20 : Études épidémiologiques ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le cancer chez l'adulte (dans l'ordre chronologique) – NS ; non significatif

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Behrens <i>et al.</i> , 2010	cas - témoins	Matrice emploi-exposition et questionnaire en face à face	Sujets de 35 à 69 ans atteints de mélanome de l'œil Témoins de population ou hospitaliers selon les pays 323 mélanomes de l'œil éligibles / 293 interviewés 3 372 témoins éligibles / 2 093 interviewés	phénotype (couleur yeux, peau), tabac, alcool	Pour le travail sur les installations de transport d'électricité, risque accru chez les femmes : ORa = 5,81 (1,72 – 19,66), pas chez les hommes Chez les hommes, risque accru pour le travail dans un transformateur : ORa = 2,14 (1,06 – 4,32)	L'étude suggère que l'exposition professionnelle aux basses fréquences peut augmenter le risque de mélanome de l'œil, chez les femmes et chez les sujets aux yeux foncés.
Baldi <i>et al.</i> , 2011	étude cas-témoins CEREPHY	Questionnaire sur histoire résidentielle et professionnelle Comparaison avec une matrice emploi-exposition suédoise pour validation prise en compte de la durée d'exposition Exposition résidentielle estimée par la distance aux lignes à haute tension	Adultes de plus de 16 ans résidant en Gironde 221 cas issus du registre national des tumeurs non cancéreuses (70 % participation) 442 témoins tirés au sort sur listes électorales (69 % participation)	niveau d'étude, tabac, alcool, pesticides, expo professionnelle aux agents chimiques	Pour l'exposition professionnelle : OR = 1,59 (0,97 - 2,61) risque plus élevé pour méningiomes : OR= 3,02 (1,10 - 8,25) mais seulement 13 cas exposés) Pour l'exposition résidentielle : risque de méningiome accru mais NS	Cette étude suggère un lien entre exposition aux champs électromagnétiques de basses fréquences et risque de méningiome Cette association a été peu étudiée car le méningiome est plus fréquent chez la femme adulte, or les études ont surtout porté sur l'enfant et sur les hommes pour l'exposition professionnelle.
Marcilio <i>et al.</i> , 2011	étude cas-témoins sur certificats de décès	Distance aux lignes et calcul du champ selon la distance et la puissance des lignes	Sujets décédés par leucémie ou tumeur cérébrale de plus de 40 ans 4 581 cas 4 706 témoins	Origine ethnique, niveau d'étude, statut marital	Risque accru de mortalité par leucémie pour les personnes vivant à moins de 50 m des lignes à haute tension : OR = 1,47 (0,99 - 2,18) Risque plus faible et non	Cette étude suggère un risque accru de leucémie chez les personnes habitant près d'une ligne haute tension (< 50m) et chez ceux dont le champ électromagnétique calculé dans leur maison est supérieur à 0,3 µT

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
					significatif pour des niveaux de champs supérieurs à 0,3 µT : OR = 1,61 (0,91 - 2,86) Aucun lien établi pour les tumeurs cérébrales et la SLA	Mais biais de sélection lié à l'inclusion des seuls cas décédés
Elliott <i>et al.</i> , 2013	Cas-témoins	modélisation à partir de la structure de la ligne estimation fournie pour l'année du diagnostic et pour 5 ans avant.	<ul style="list-style-type: none"> Cas : sujets de 15-74 ans Registre National des Cancers, vivant à moins de 1 000 m d'une ligne haute tension. 7 823 cas de leucémies 6 781 cas de tumeur du SNC 9 153 cas de mélanome 29 202 cas de cancer du sein Témoins : atteints d'autres cancers sélection de 79 507 sujets sur 164 095 éligibles 	âge, sexe, ruralité, déprivation	OR de 0,82 (mélanome) à 1,22 (SNC) tous non significatifs OR encore plus faibles avec l'estimation de l'exposition aux champs électromagnétiques	L'étude ne montre pas d'association entre champs électromagnétiques et cancers de l'adulte.
Li W <i>et al.</i> , 2013	Étude cas-témoins dans une cohorte	Matrice Emploi-Exposition développée, incluant l'histoire professionnelle de femmes + mesures dans 57 usines pour 102 postes	Femmes travailleuses du textile de 503 usines, nées entre 1925 et 1958, recrutées en 1989-1991, diagnostiquées de cancer entre 1989 et 2000. 1 763 cas de cancers du sein 4 780 non cas	nombre de naissances, âge à la première naissance, durée d'allaitement tabac, alcool	OR proche de 1 pas de tendance pas de lien avec la durée de l'exposition	L'étude ne soutient pas l'hypothèse que l'exposition aux champs électromagnétiques augmente le risque de cancer du sein
Koeman <i>et al.</i> , 2014	étude de cohorte sur alimentation et cancer	Matrice Emploi-Exposition avec attribution d'une exposition aux champs électromagnétiques. 3 types d'analyses : - exposition faible ou élevée - durée d'exposition - exposition cumulée	120 852 sujets de 55-69 ans Recrutement en 1986 et suivi pendant 17 ans Croisement avec registre national pour repérer les cas de cancer (poumon, sein, cerveau, hémopathies)	tabac, alcool, niveau d'étude, IMC, alimentation (légumes, fruits, viande, calories...) pour poumon : exposition amiante, silice, solvants ... Sein : contraception, supplémentation en hormones, âge au PR, ménopause, parité, âge à 1ère naissance	Pas d'association pour les cancers du poumon, du sein et les tumeurs cérébrales. Association significative pour : LAM : HR = 2,15 [1,06 - 4,35] Lymphome folliculaire : HR = 2,78 [1,0 - 5,77] Les analyses de sensibilité ne changent pas les résultats (tps de latence de 20 ans, exclusion des sujets avec données imprécises).	Possibilité d'un risque accru de LAM et de LNH chez les hommes uniquement. L'évolution des classifications des lymphomes dans le temps rendent l'interprétation de ce résultat difficile. pas d'observation de tendance

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Turner <i>et al.</i> , 2014	Étude cas-témoins INTERROC (sous-ensemble de 7 pays d'INTERPHONE)	Recueil de l'histoire professionnelle détaillée et construction d'une matrice emploi exposition	Sujets de 30 – 59 ans 3 761 cas de tumeurs cérébrales (1 939 gliomes et 1822 méningiomes) 5404 témoins de population	Statut marital, tabac, SES, allergies, exposition aux radiations ionisantes, exposition au téléphone mobile. Réalisation d'analyses de sensibilité	Pas d'association avec l'exposition cumulée tout au long de la vie pour les gliomes et méningiomes Association avec l'exposition cumulée dans les 1-4 ans avant le diagnostic : $OR_{\text{gliome}} = 1,67 [1,36 - 2,07]$ $OR_{\text{méningiome}} = 1,23 [0,97 - 1,57]$	Le lien avec l'exposition récente pour les gliomes et à un niveau moindre pour les méningiomes, est compatible avec un effet promoteur des champs électromagnétiques de basses fréquences.
Sorahan <i>et al.</i> , 2014a	Étude de cohorte	histoire professionnelle des sujets, durée d'exposition	Adultes, employés des centrales électriques : 83 997 employés, analyse sur 73 051 sujets, 372 tumeurs cérébrales détectées (mortalité ou registre)	âge, sexe, période, SES	Pas d'association pour les gliomes ni méningiomes quelle que soit la période d'exposition (inférieure ou supérieure à 10 ans)	Cette étude ne supporte pas l'hypothèse d'un risque accru de tumeur du SNC.
Sorahan <i>et al.</i> , 2014b	Étude de cohorte	histoire professionnelle des sujets, durée d'exposition	Adultes, employés des centrales électriques : 83 997 employés, analyse sur 73 051 sujets, 352 leucémies détectées (mortalité ou registre)	âge, sexe, période, SES	Pas de lien avec les hémopathies sauf pour les LAL mais très peu de sujets et risque inhabituellement bas dans la catégorie non-exposée.	Cette étude ne supporte pas l'hypothèse d'un risque accru de LAM, LMC ou LLC. Le risque augmenté pour les LAL peut être dû au hasard.
Talibov <i>et al.</i> , 2015	Étude cas-témoins nichée dans cohorte	Matrice emploi-exposition	Étude cas-témoins nichée dans la cohorte NOCCA 5 409 sujets atteints de LAM de plus de 20 ans recrutés sur le registre des tumeurs 27 045 témoins (5 par cas) tirés au sort dans la cohorte	Aucun Réalisation d'analyses de sensibilité	Pas d'association entre l'exposition professionnelle LAM, ni pour les champs électromagnétiques basses fréquences, ni pour les chocs électriques. $RR = 0,88 [0,77 - 1,01]$ pour exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences	Cette étude ne supporte pas l'hypothèse d'une association entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et aux chocs électriques et la LAM

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
					élevés, RR = 0,94 [0,85 - 1,05] pour les travailleurs à haut risque de chocs électriques	
Kato, <i>et al.</i> , 2015	étude de cohorte (<i>Women's Health Initiative</i>)	questionnaire sur l'utilisation de couvertures chauffantes (57 % d'exposées)	Femmes ménopausées (50-79 ans) 89 527 femmes 2,35 % perdus de vue et suivi moyen 12,2 ans	Origine ethnique, région, revenus annuels, antécédent de pathologie thyroïdienne, IMC, taille, antécédent de contraception orale, THS.	pas de différence de risque de cancer de la thyroïde selon l'utilisation de couverture chauffante HR = 0,98 (0,72 – 1,32)	Cette étude n'établit pas de lien entre le cancer de la thyroïde et l'utilisation de couverture chauffante.

Tableau 21 : Méta-analyse investiguant le lien entre les cancers de l'adulte et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion article
Chen <i>et al.</i> , 2010	Méta-analyse (15 études)	Dépendant des études	Articles publiés entre 2000 et 2009 7 études basées sur registre des cancers 24 338 cas 60 628 témoins (population générale, appariés sur l'âge, origine ethnique, année)	analyse en sous-groupes selon : - type exposition : professionnel/résidentiel/couvertures chauffantes - statut ménopausique, - présence de récepteurs œstrogènes	Pas d'association significative : comparaison globale (OR = 0,99 [0,89 - 1,09]) - ni pour les analyses par sous-groupes	Cette méta-analyse suggère que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences n'a pas d'association avec le risque de cancer du sein chez la femme

6.4 Maladies neurodégénératives

Les maladies neurodégénératives sont multiples et se caractérisent par des étiologies complexes. Les études sur l'association entre maladies neurodégénératives et champs électromagnétiques basses fréquences ont porté sur la maladie d'Alzheimer (MA), les maladies des neurones moteurs (MNM) (principalement sclérose latérale amyotrophique (SLA)), la maladie de Parkinson (MP), la sclérose en plaques (SP) et les démences.

Concernant les maladies neurodégénératives, la question de la latence entre l'exposition et l'apparition des symptômes est, comme pour les cancers, particulièrement importante. Par ailleurs, contrairement aux cancers, les maladies neurodégénératives sont rarement répertoriées dans un registre de population. L'identification des cas dans les études épidémiologiques se fait soit à partir de données hospitalières (cas incidents ou plus fréquemment cas prévalents) soit à partir des causes de décès, posant le problème de la fiabilité des certificats de décès et le risque de sous-estimation en cas de causes compétitives de décès.

6.4.1 Exposition professionnelle

En 2010, Andel *et al.*, (2010) ont utilisé le registre suédois des jumeaux, et plus particulièrement l'étude Harmony visant à suivre les paires de jumeaux de plus de 65 ans, pour explorer le lien entre exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de démence ou de MA. Sur 9 508 sujets inclus, 216 ont été classés comme cas présentant une démence et 9 292 comme témoins. Le métier occupé pendant la plus grande partie de leur vie était recueilli par téléphone au moment de l'inclusion (information recueillie auprès d'un proxy si nécessaire (7 % des cas)). L'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences était ensuite estimée à partir d'une matrice emploi-exposition élaborée précédemment. Il n'y avait pas d'association significative entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la démence ou la maladie d'Alzheimer de façon globale (quels que soient l'âge ou le niveau d'exposition). On observait néanmoins un lien significatif lorsque l'âge de début de la démence était antérieur à 75 ans pour le niveau moyen d'exposition (OR = 1,94 [1,07 - 3,65]) et pour le niveau élevé d'exposition (OR = 2,01 [1,10 - 3,65]). De même, un risque accru était également observé chez les travailleurs manuels pour le niveau moyen d'exposition (OR = 1,81 [1,06 - 3,09]) et pour le niveau élevé d'exposition (OR = 1,75 [1,00 - 3,05]). Les auteurs concluent qu'il est possible que l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences augmente le risque de démence avant 75 ans, ce qui pourrait s'expliquer par une accélération du processus de dégénérescence cérébrale. Le lien observé chez les travailleurs manuels peut moins s'expliquer par une susceptibilité particulière que par une potentialisation par les champs électromagnétiques d'autres facteurs de risque (expositions professionnelles ou habitudes de vie).

La mortalité par SLA a été examinée dans une étude de cohorte américaine « *the National Longitudinal Mortality Study* » (Parlett, 2011). L'exposition professionnelle aux champs magnétiques a été déterminée à l'aide d'une matrice d'exposition professionnelle générique. Après ajustement selon l'âge, le sexe et l'éducation, les résultats n'ont pas mis en évidence d'augmentation du risque de mortalité par SLA en relation avec l'exposition potentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences, avec des ratios de risque proches de 0 dans tous les quartiles d'exposition aux champs magnétiques. Cette étude présente de nombreuses limites : temps de suivi peu important, étude sur les décès, prise en compte du dernier emploi occupé sans information sur l'exposition cumulée.

Zhou *et al.*, (2012) ont conduit une méta-analyse spécifique sur les SLA (représentant la vaste majorité des MNM). Cette étude portait sur 17 études globalement hétérogènes : 9 études cas-témoins et 8 études de cohorte. Dans 7 études, l'exposition était estimée d'après l'intitulé du poste, dans 5 études d'après une matrice emploi-exposition et dans 2 études d'après les 2 méthodes. L'analyse montrait un risque légèrement accru pour les études poolées (RR = 1,29 [1,02 - 1,39]) et dans les études cas-témoins (OR = 1,39 [1,05 - 1,84]) mais pas dans les études de cohorte

(RR = 1,16 [0,80 - 1,69]. Le lien était aussi plus marqué dans les études sur la morbidité que dans les études basées sur les certificats de décès. Au total, les auteurs de cette méta-analyse concluaient à une légère sur-incidence de SLA, celle-ci étant néanmoins affectée par un biais de publication important (Egger test significatif).

En 2013, une méta-analyse a été publiée sur le lien entre l'exposition professionnelle et le risque de développer une maladie neurodégénérative. Cette méta-analyse a porté sur les articles publiés en anglais et référencés dans *Pubmed* jusqu'au 12/01/2012 (Vergara *et al.*, 2013). Au total⁵⁵, 42 études ont été incluses dans cette méta-analyse (20 ont porté sur la MA ; 21 sur les MNM (incluant les SLA), 18 sur MP, 9 sur les démences et 5 sur les SP). Cette méta-analyse a montré une faible sur-incidence des MNM (RR = 1,26 (1,10 - 1,44)) et des MA (RR = 1,27 (1,15 - 1,40)). Relativement peu nombreuses, les études portant sur les liens avec les autres maladies neurodégénératives ne montraient pas d'association significative. Les auteurs soulignaient la présence d'un biais de publication en faveur des résultats positifs, particulièrement dans la MA. Des recherches dans des bases de données bibliographiques autres que *Pubmed* auraient probablement permis de réduire ce biais. Les auteurs concluaient qu'un sur-risque concernant les SLA pouvait être suspecté et que le sur-risque concernant la MA pouvait être expliqué, au moins en partie, par le biais de publication. Concernant les maladies à neurones moteurs (incluant les SLA), les associations étaient plus fortes pour les études utilisant les intitulés des emplois que pour les études utilisant les mesures de champs, évoquant ainsi un rôle potentiellement important des co-expositions. En conséquence, les auteurs concluent que les champs électromagnétiques basses fréquences ne sont pas à l'origine du lien observé entre les intitulés des emplois et les MNM.

Depuis ces méta-analyses, cinq autres études ont été conduites sur les maladies dégénératives :

- une étude de cohorte chez les ouvriers de l'industrie électrique au Royaume-Uni a recherché l'existence d'un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de mortalité par MA, MNM et MP (Sorahan et Mohammed, 2014). Aucun risque statistiquement significatif n'a été relevé pour aucune des 3 maladies selon les expositions aux champs magnétiques passées, récentes ou cumulées ;
- investiguant l'influence de l'exposition professionnelle sur l'incidence des SLA, une étude de cohorte suisse (Huss *et al.*, 2015a) fondée sur les professions enregistrées dans les recensements de 1990 et de 2000 et le registre des décès n'a pas retrouvé de lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de décès en rapport avec les SLA (HR = 1,10 [0,59 – 2,05]) pour le recensement de 1990, ni pour le recensement de 2000. La mortalité due à la SLA était néanmoins plus élevée chez les personnes exposées aux champs électromagnétiques basses fréquences lors des deux recensements (HR = 1,55 [1,11 – 2,15]), plaidant pour un effet possible de l'exposition prolongée ;
- une étude basée sur les certificats de décès de 1991 à 1999 a été menée aux États-Unis dans les états qui mentionnent la profession habituelle sur le certificat de décès (Vergara *et al.*, 2015). Cinq mille huit cents quatre-vingt-six décès par SLA ont été comparés à 57 667 témoins décédés d'une autre cause (exclusion des pathologies pouvant être liées aux champs électromagnétiques basses fréquences). L'exposition a été estimée avec une matrice emploi-exposition et classée en 3 niveaux d'exposition (< 0,1 µT ; 0,1 - 0,3 µT et ≥ 0,3 µT). Les activités d'électricité et de soudure ont également été évaluées. Un risque légèrement augmenté a été observé pour les professions liées à l'électricité : OR = 1,23 [1,04 - 1,47], alors que chez les soudeurs, le risque était réduit : OR = 0,70 [0,55 - 0,89]. Pour les expositions aux

⁵⁵ Les études de Andel *et al.*, (2010) et Parlett *et al.*, (2011), apparaissant dans les résultats de l'équation de recherche, sont incluses dans cette méta-analyse et décrites précédemment. L'étude de Firestone *et al.*,(2010) n'a pas été décrite car elle n'apporte aucun élément sur le lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

champs électromagnétiques basses fréquences, les OR de SLA étaient proches de 1 et non significatifs alors que pour les chocs électriques, les OR étaient inférieurs à 1. La discordance entre les résultats sur la profession et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences suggère que le lien passe par une autre exposition (solvants, pesticides, métaux, traumatisme physique par exemple, traumatisme crânien). Cette étude est intéressante par sa grande ampleur et la qualité de la méthodologie d'analyse mais présente les limites propres aux études sur la mortalité : qualité des certificats de décès (cause du décès, profession). Ces résultats ne permettent pas de confirmer que l'exposition aux chocs électriques et aux champs électromagnétiques basses fréquences en milieu professionnel est liée au développement de SLA ;

- pour compléter ces observations basées sur la mortalité, une étude cas-témoins a été menée en Suède sur les cas incidents identifiés dans le registre des hospitalisations des patients suédois (Fischer *et al.*, 2015). Parmi les sujets nés entre 1901 et 1970, 4 709 cas ont été identifiés avec un diagnostic de SLA et comparés à 23 335 témoins appariés sur le sexe et l'année de naissance et n'ayant pas cette maladie. À l'aide de matrices emploi-exposition concernant les chocs électriques et les champs magnétiques, les auteurs ont évalué la relation entre l'exposition aux chocs électriques et aux champs magnétiques et l'incidence de la SLA. Ils ont également cherché si le fait d'exercer une « profession électrique » ou le métier de soudeur avait un lien avec la SLA. Des sous-analyses ont été menées selon le sexe et l'âge (plus ou moins de 65 ans). Il n'a pas été observé d'association entre les chocs électriques et la pathologie de façon globale, mais l'exposition moyenne ou haute aux chocs électriques était associée à la SLA chez les moins de 65 ans (OR = 1,20 [1,02 - 1.40] et 1,22 [1,03 - 1,43] respectivement). En revanche, aucune association n'a été retrouvée avec l'exposition aux champs électromagnétiques, quelles que soient les matrices emploi-exposition utilisées, les expositions définies ou les valeurs seuils choisies. Pour les professions électriques, l'OR était proche de l'unité, quel que soit l'âge. Cependant, l'exposition aux champs électromagnétiques liée au fait d'être soudeur est associée au risque de SLA (OR de 1,52 [1,05 - 2,21]) pour les moins de 65 ans. Cette vaste étude, qui ne présente pas les biais habituels des études basées sur la mortalité, ne confirme pas le risque plus élevé de SLA dans les professions électriques ou avec une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques mais évoque la possibilité d'un lien entre les chocs électriques et la SLA.
- une étude réalisée aux Pays-bas (Koeman *et al.*, 2015) a étudié l'influence d'une exposition professionnelle à divers polluants sur le risque de décès par démence. Au sein d'une cohorte de plus de 120 000 sujets, une matrice emploi-exposition a permis d'évaluer l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. Après 17,3 années de suivi, 682 hommes et 870 femmes étaient décédés d'une démence non vasculaire. Dans cette étude, l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences était significativement associée au risque de décès par démence uniquement chez les hommes, dans la catégorie intermédiaire d'exposition (HR = 1,74 (1,29 - 2,36)). Comme aucun lien n'a été montré avec l'exposition cumulée ou la catégorie d'exposition la plus élevée, cette étude, comme souligné par les auteurs, n'est pas en faveur d'une relation entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de démence non vasculaire.

Au sein d'une cohorte constituée en 1986 et suivie jusqu'en 2003 (Koeman *et al.* 2015), une sous-cohorte de 5 000 sujets a été constituée aléatoirement ; un questionnaire sur l'exposition professionnelle et d'autres expositions personnelles comme la consommation de tabac, d'alcool, de café et de thé, l'activité physique et le niveau d'étude avait été administré lors de l'inclusion dans la cohorte (Brouwer *et al.*, 2015). Le lien avec les certificats de décès a permis de répertorier 465 hommes et 280 femmes décédés de MP. L'information sur les expositions professionnelles et les autres facteurs d'exposition a pu être obtenue pour 402 hommes et 207 femmes, inclus dans l'analyse. Chez les hommes, des risques plus élevés ont été observés pour l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences : HR = 1,54 [1,00 - 2,36]. La portée de ce résultat reste limitée en raison de l'absence de lien avec la durée d'exposition ou de tendance avec

l'exposition cumulée et de la sélection des cas à partir des certificats de décès pour une maladie non forcément létale par elle-même.

Concernant la maladie de Parkinson, une étude cas-témoins menée dans 5 hôpitaux des Pays-Bas (Van der Mark, 2015) a inclus 444 patients parkinsoniens et 876 témoins appariés selon l'âge et le sexe. Les antécédents professionnels ont été recueillis lors d'interviews téléphoniques et ont été liés à des matrices emploi-exposition. En outre, des questions ont été posées sur l'utilisation d'appareils ménagers entraînant une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, les chocs électriques reçus et les facteurs confondants potentiels (tabac, café, niveau d'étude). Aucune association entre MP et les expositions évaluées n'a été observée avec même l'observation d'une réduction du risque. L'existence d'un effet protecteur des champs électromagnétiques basses fréquences étant toutefois peu probable, les auteurs l'expliquent par la possibilité d'un biais de sélection lié au faible taux de réponse (45 % chez les cas et 35 % chez les témoins) ou d'un effet confondant lié au fait que les cas avaient un niveau d'étude plus élevé et des professions potentiellement moins exposées aux champs électromagnétiques que les témoins. Au total, les auteurs concluent à l'absence d'association entre la MP et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Enfin, une méta-analyse publiée en 2015 a inclus 11 études publiées jusqu'en mars 2015⁵⁶ (Huss *et al.*, 2015b). Globalement, cette méta-analyse n'a pas mis en évidence de lien entre une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de développer la maladie de Parkinson (sRR⁵⁷ = 1,05 [0,98 – 1,13]). L'hétérogénéité entre les études était modérée et n'était pas expliquée par le type de mesure de l'exposition ou par le fait que la population soit issue de la population générale ou d'une cohorte de travailleurs. Ainsi, il semble exclu que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences puisse être associée à une élévation du risque d'apparition de la maladie de Parkinson.

6.4.2 Exposition résidentielle

Une étude (Frei *et al.*, 2013) a investigué le rôle de l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence des maladies neurodégénératives. Cette étude cas-témoins a porté sur l'ensemble de la population danoise (5,5 millions d'habitants). Les cas ont été sélectionnés à partir des registres hospitaliers opérant sur le territoire danois (99 % des hospitalisations). Six témoins par cas, appariés sur l'âge et le sexe, ont été utilisés. Aucune augmentation de risque n'a été mise en évidence chez les sujets ayant vécu à proximité d'une ligne HT/THT, quelle que soit la pathologie étudiée (MA : OR = 1,04 (0,69 - 1,56) ; démence vasculaire OR = 0,80 (0,43 - 1,52) ; autres démences OR = 0,93 (0,74 - 1,17) ; MP : OR = 1,14 (0,79 - 1,64) ; SEP : OR = 1,03 (0,67 - 1,58) ; MNM : OR = 0,80 (0,34 - 1,89)). Malgré les limites des études utilisant la distance aux lignes HT/THT pour apprécier l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, cette vaste étude ne montre aucune élévation du risque de développer une MND en relation avec une exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Une étude cas-témoins menée aux Pays-Bas et incluant 1 139 cas de SLA et 2 864 témoins appariés n'a pas retrouvé d'augmentation de risque de SLA chez les personnes vivant à proximité d'une ligne HT. Cette étude souffrait de l'absence de cas et de témoins à proximité immédiate des lignes THT (Seelen *et al.*, 2015). Pour pallier ce manque de puissance, les auteurs ont réalisé une méta-analyse combinant leurs résultats et les résultats de 2 autres études cas-témoins antérieures (Frei, 2013 et Marcilio, 2011). Aucune association n'a été trouvée entre l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences et la SLA.

⁵⁶Les études de Brouwer *et al.*, 2015 ; de Van der mark 2014 ; de Sohahan 2014 ; apparaissant dans notre équation de recherche sont incluses dans cette méta-analyse.

⁵⁷ sRR = *summary relative risk*.

Tableau 22 : Études épidémiologiques ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et les maladies neurodégénératives (dans l'ordre chronologique)

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Andel <i>et al.</i> , 2010	Étude de cohorte	Recueil d'informations sur le métier collectées par téléphone en 1998. Élaboration d'une matrice emploi-exposition publiée dans une étude précédente puis complétée par des mesures dans certains cas.	Sujets de plus de 65 ans en 1998, issus du registre suédois des jumeaux 9 508 participants : <ul style="list-style-type: none"> • 216 avec démence (141 sujets atteints de MA) • 9292 témoins 	Âge au <i>screening</i> , sexe, niveau d'étude, complexité du travail, coronaropathie, AVC, âge au début de la démence : variable de stratification	OR supérieur à 1 pour expo moyennes ou élevées, mais non significatif. Résultats selon l'âge montrent un risque accru significatif (OR = 1,94 [1,07 - 3,65] et 2,01 [1,10 - 3,65] seulement si l'âge de début de la démence est autour de 75 ans et non après. Effet dose-réponse significatif pour début avant 75 ans.	L'exposition professionnelle semble augmenter le risque de démence principalement pour l'apparition de la démence à un âge précoce (≤ 75 ans) ou pour les travailleurs manuels
Marcilio <i>et al.</i> , 2011	Étude cas-témoins	distance aux lignes + calcul du champ selon la distance et la puissance des lignes	Certificats de décès de la région de Sao Paulo <ul style="list-style-type: none"> • 4 581 cas • 4 706 témoins 	Ethnies, niveau d'étude, statut marital	aucun lien entre exposition et décès par SLA	aucun lien entre exposition et décès par SLA
Parlett <i>et al.</i> , 2011	Étude de cohorte : National longitudinal mortality study	Emploi dans la semaine avant l'inclusion, codage des emplois puis réalisation d'une matrice emploi-exposition	306 891 personnes incluses (avec données professionnelles) Croisement avec le registre des décès	Modèle de Cox prenant en compte : âge, sexe, ethnies, niveau d'étude, revenu	Pas d'augmentation du risque de décès par MNM lié à exposition aux basses fréquences	Cette étude ne fournit pas de preuve d'une association entre exposition aux basses fréquences et mortalité par MNM

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Frei <i>et al.</i> , 2013	Étude cas-témoins de population (basé sur registre central de population)	Histoire résidentielle depuis 1968 / tronquée à 20 ans avant le diagnostic (adresses avant 1974 peu fiables) - distance aux LHT (\geq 132 kV) - catégories : < 50 m, 50-200 m, 200 – 600 m	Sujets de plus de 20 ans Cas identifiés à partir du registre danois des séjours hospitaliers : au moins 2 diagnostics de MNM 6 témoins par cas	Indicateurs socioéconomiques contextuels (revenu, niveau d'étude) statut marital, nombre d'étages de l'appartement	Pas d'augmentation du risque de démence, Alzheimer, Parkinson ou SLA (MNM) à proximité des lignes pas d'effet dose Indication d'un risque accru pour les personnes entre 65 et 75 ans diagnostiquées après 2003 d'une MA vivant à moins de 50 m d'une ligne. HR = 2,59 (1,17 – 5,76)	Cette étude ne supporte pas l'hypothèse d'une association entre MNM et résidence près d'une ligne HT. L'association retrouvée n'est basée sur 9 cas seulement, ce qui limite la portée de ce résultat.
Sorahan et Mohammed, 2014	Étude de cohorte	Histoire professionnelle	Adultes, employés des centrales électriques en grande Bretagne : 73 051 sujets (62 825 hommes 10 226 femmes) 170 cas de MA 86 cas MNM 278 cas MP	Sexe, âge, SES, période	Aucun lien trouvé avec MA Pour MNM, RR >1 avec 1ère catégorie d'exposition sans effet dose Pour MP, RR>1 pour 2ème catégorie d'expo sans effet dose Même résultats en restreignant les analyses aux 48 768 sujets à leur 1er emploi dans des centrales électriques	Cette étude ne fournit pas de preuve convaincante que l'exposition aux champs magnétique basses fréquences est un facteur de risque de MNM
Seelen <i>et al.</i> , 2014	Étude cas-témoins de population	Histoire résidentielle des individus d'après les fichiers municipaux - distance aux lignes HT - catégories : < 50 m, 50 – 200 m, 200 – 600 m - catégories de durée : < 5 ans, 5 - 10 ans, 10 – 15 ans, \geq 15 ans	1 139 SLA 2 864 témoins appariés	Sexe, âge	Pas de d'augmentation du risque de SLA chez les personnes vivant à proximité des LHT versus > 600 m. Pas d'effet dose-réponse. Méta-analyse faite avec 2 autres études (Frei et Marcilio) ne montre pas d'association	En tenant compte des autres études, on peut conclure que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences des lignes HT n'augmente pas le risque de SLA

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Huss <i>et al.</i> , 2015a	Étude de cohorte (cohorte nationale suisse)	Matrice-emploi exposition : exposition basse, moyenne, élevée. Intitulé du poste : exposition basse, moyenne, élevée	Sujets de plus de 30 ans 1 358 personnes décédées de SLA	Autres expositions professionnelles (pesticides, herbicides, solvants chlorés, métaux lourds)	Pas de lien entre exposition lors d'un des 2 recensements avec décès par SLA mais mortalité due à SLA plus élevée chez les personnes dont l'exposition aux champs magnétiques a été estimée moyenne ou haute lors des deux recensements HR = 1,55 (1,11 – 2,15)	Cette étude montre une association entre l'exposition aux basses fréquences et la mortalité due à la SLA chez les travailleurs exposés à long terme.
Koeman <i>et al.</i> , 2015	Étude de cohorte	Expositions professionnelles classées selon matrice emploi-exposition	Sujets de 55 à 69 ans 120 852 sujets cause de décès : démence non vasculaire 798 hommes et 1 171 femmes décédées de démence	Autres expositions professionnelles (pesticides, herbicides, solvants chlorés, métaux lourds) tabac, activité physique et IMC	L'exposition professionnelle aux métaux, aux solvants chlorés et aux basses fréquences a montré des associations positives avec la démence non-vasculaire chez les hommes, peut-être due aux métaux (HR exposition élevée/exposition de fond 1,35 [0,98 à 1,86])	Des associations positives cohérentes ont été trouvées entre l'exposition professionnelle à des métaux et la démence non-vasculaire
Brouwer <i>et al.</i> , 2015	Étude de cohorte (idem étude Koeman 2015) sous-cohorte de 5 000 participants	Auto-questionnaire sur exposition professionnelle et autres expositions personnelles comme le tabac, Code de l'emploi (ISCO) puis matrice emploi-exposition (adaptée de Bowman 2007)	Sujets de 55 à 69 ans 5 000 sujets : 2098 hommes et 2 083 femmes inclus Suivi moyen jusqu'au décès ou date des dernières nouvelles : 14,6 ans	Modèle de Cox prenant en compte : tabac, alcool, café, thé, IMC, activité physique, niveau d'étude	Peu d'associations significatives avec décès par MP : <ul style="list-style-type: none"> HR élevé mais NS pour pesticides sauf premier tertile d'expo Association significative avec exposition élevée aux champs basses fréquences : HR = 1,54 [1,00 - 2,36] HR < 1 pour choc électrique Aucune tendance avec expo cumulée ou avec durée d'expo. 	association entre forte exposition aux basses fréquences et MP mais portée faible en l'absence d'effet dose-réponse → ne supporte pas l'hypothèse d'une augmentation de la mortalité par MP même si on ne peut pas exclure un excès de risque faible

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Fischer <i>et al.</i> , 2015	Étude cas-témoins de population	<ul style="list-style-type: none"> Pour les champs électromagnétiques de basses fréquences : matrice emploi exposition (Interocc) adaptée + JEM suédoises / cut-off à 0,15 et 0,30 μT Pour les chocs électriques : matrice emploi-exposition européenne + américaine pour analyse sensibilité 	<p>Individus nés entre 1901 et 1970, présents dans le recensement de 1990</p> <p>Registre des hospitalisations</p> <p>4 709 cas de SLA</p> <p>23 335 témoins (pas de diagnostic de SLA)</p>	<p>Niveau d'étude (9, 12 ans ou universitaire)</p> <p>- niveau socio-économique (selon profession)</p> <p>- région de résidence</p>	<p>Globalement, pas d'association entre exposition aux champs électromagnétiques de basses fréquences ou chocs électriques et SLA.</p> <p>Chez les moins de 65 ans, l'exposition à de nombreux chocs électriques est associée à la SLA (OR = 1,22 [1,03-1,43])</p> <p>Pour les professions, pas de lien entre la survenue SLA et les métiers de l'électricité.</p> <p>Pour les soudeurs lien seulement chez les moins de 65 ans : OR = 1,52 [1,05-2,21]</p>	<p>Cette étude ne confirme pas les observations précédentes relatant un risque plus élevé de SLA dans les professions électriques et apporte seulement un support faible aux associations entre les chocs électriques et SLA.</p>
Van Der Mark <i>et al.</i> , 2015	Étude cas-témoins hospitalière (5 hôpitaux)	<p>Interviews standardisées par téléphone</p> <p>Puis lien avec matrice emploi-exposition</p> <p>Questions sur expositions domestiques</p>	<p>Cas : sujets atteints de la MP</p> <p>Témoins : sujets atteints d'autres pathologies neurologiques non dégénératives</p> <p>444 patients avec parkinson et 876 témoins appariés (âge et sexe)</p>	<p>Niveau d'étude, consommation de tabac et de café</p>	<p>tous les OR < 1. pas d'effet avec la durée d'exposition. Pas d'association avec l'exposition domestique.</p> <p>Pas d'effet non plus des chocs électriques</p> <p>OR < 1 peut s'expliquer par niveau d'éducation plus élevé des cas, postes moins exposés, activité physique peut être en cause (diminue le risque de MP)</p>	<p>Cette étude ne met pas en évidence d'association entre l'exposition domestique ou professionnelle aux champs magnétique basse fréquence, ni aux chocs électriques et la maladie de Parkinson.</p>

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Vergara <i>et al.</i> , 2015	Étude cas-témoins	<p>Profession habituelle mentionnée sur certificat de décès. Classement en 3 niveaux d'exposition :</p> <ul style="list-style-type: none"> • référence ou faible expo : $< 0,1 \mu\text{T}$ • exposition moyenne : $0,1 \mu\text{T} - 0,3 \mu\text{T}$ • exposition élevée : $\geq 0,3 \mu\text{T}$ 	<p>Certificats de décès 5 886 décès par SLA 57 667 témoins parmi les décès d'autres causes, exclusion des pathologies pouvant être liées aux champs électromagnétiques de basses fréquences (cancers, MNM, maladies cardiovasculaires, accidents).</p>	Niveau d'étude, origines ethniques	<p>Risque accru de SLA pour les niveaux d'étude les plus élevés (> 13 ans) : OR = 1,85 [1,67 - 2,04]</p> <p>Risque également un peu augmenté pour les professions liées à l'électricité : OR = 1,23 [1,04 - 1,47].</p> <p>Pour les chocs électriques et pour les professions de soudage, association inverse (OR < 1).</p> <p>Pour les champs électromagnétiques basses fréquences, les OR de SLA étaient proches de 1 et non significatifs.</p>	<p>Une association entre les professions liées à l'électricité et la SLA a été observée, mais pas d'association entre l'exposition aux chocs électriques ou aux champs électromagnétiques de basses fréquences. Cette discordance entre les 2 résultats suggère que le lien passe par une autre exposition (solvants, pesticides, métaux, traumatisme physique (trauma crânien par ex) ...</p> <p>Les résultats ne confirment pas que l'exposition aux chocs électriques et aux CM en milieu professionnel permet d'être en lien avec la SLA.</p>

Tableau 23 : Méta-analyses ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et les maladies neurodégénératives (dans l'ordre chronologique)

Ce tableau présente une synthèse des principaux résultats de l'étude et ne reflète en aucun cas leur interprétation par l'Anses.

Étude	Type d'étude	Caractérisation de l'exposition	population étudiée et nombre de sujets	Facteurs de confusions pris en compte	Résultats	Conclusion des auteurs
Vergara <i>et al.</i> , 2013	Méta-analyse de 44 études (42 articles)	Dépend des études Matrice emploi-exposition Jugement d'expert Mesures réelles	27 études cas-témoins 15 études de cohortes nombre de sujets : non indiqué	Dépend des études en commun : âge, sexe SES, période, région, urbain/rural, ethnies.	Association faible entre exposition professionnelle aux champs magnétique et maladie du motoneurone (RR = 1,26 [1,10 - 1,44]) et Alzheimer (RR = 1,27 [1,15 - 1,40]), pas avec les autres. Divergence selon le mode d'estimation de l'exposition (+ élevé avec intitulé du poste et mesure, moindre avec JEM). + biais de publication possible, car RR plus faible dans les études d'incidence	Nécessité d'améliorer l'évaluation de l'exposition et de la classification des maladies (pas de registre, sous-estimation de l'incidence de ces maladies)
Zhou, <i>et al.</i> , 2012	Méta-analyse de 17 études sur la SLA	expo professionnelle aux champs magnétiques : • intitulé du poste : 7 études • matrice emploi-expo : 5 études • les 2 : 5 études	9 études cas-témoins (de 25 à 6 347 cas) 8 études de cohortes (de 20 141 à 4 812 646 personnes)	Âge, sexe	<ul style="list-style-type: none"> Risque légèrement augmenté dans les études poolées (RR = 1,29 [1,02 - 1,62]) et les études cas-témoins (OR = 1,39 [1,05 - 1,84]) mais pas dans les études de cohorte (RR = 1,16 [0,80 - 1,69]) Risque accru avec intitulé du poste mais pas avec matrice emploi-exposition. Risque accru avec diagnostic clinique mais pas certificat de décès. Biais de publication possible 	Risque faiblement élevé de SLA lié à l'exposition aux basses fréquences mais possibilité de biais lié aux facteurs de confusion et biais de publication possible
Huss <i>et al.</i> , 2015b	Méta-analyse de 11 études sur 177 identifiées	Dossiers professionnels, recensement ou questionnaires	Maladie de Parkinson identifiée dans dossiers médicaux (2 études) ou certificats de décès de 45 à 33 678 cas		Le risque de maladie de Parkinson n'était pas plus important chez les travailleurs exposés aux basses fréquences RR = 1,05 [0,98 - 1,13]	Dans l'ensemble, pas de preuve d'une augmentation du risque de la maladie de Parkinson par l'exposition aux basses fréquences

7 Études expérimentales

7.1 Recherche de mécanismes pouvant expliquer un effet cancérigène

De nombreuses équipes de recherche ont effectué des études *in vitro* ou *in vivo* afin de mieux comprendre les mécanismes régissant les interactions entre les champs électromagnétiques basses fréquences et la matière vivante. Ces travaux peuvent avoir deux finalités distinctes : 1) essayer de confirmer l'existence de processus physiopathologiques qui pourraient expliquer des effets sanitaires suspectés ou investigués dans les études épidémiologiques ; 2) essayer de valider l'utilisation de ces ondes dans certaines applications thérapeutiques.

7.1.1 Introduction et rappel des conclusions de l'expertise précédente

Plusieurs pistes de recherche ont été explorées pour tenter de prouver l'existence d'une relation directe de cause à effet entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et des pathologies. Dans ce cadre, de nombreuses équipes ont étudié un effet génotoxique potentiel des champs électromagnétiques basses fréquences qui pourrait expliquer l'association retrouvée dans certaines études épidémiologiques entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences et le développement de leucémies chez l'enfant. Cette stratégie s'explique très bien dans la mesure où le lien entre l'apparition de dommages à l'ADN et le cancer, de façon générale, est avéré. Cependant, d'autres hypothèses peuvent être émises pour la recherche de mécanismes d'action des champs électromagnétiques sur le vivant. Ainsi, certaines équipes ont par exemple recherché un effet des champs basses fréquences sur le cycle cellulaire ou sur la dé-différenciation des cellules.

Les précédentes expertises de l'agence sur le sujet (Afsset, 2010 et Anses, 2015) indiquaient que les études *in vivo* analysées ne permettaient pas de conclure que les champs électromagnétiques basses fréquences étaient capables d'induire des cancers ou d'accélérer la croissance des tumeurs greffées. Les études *in vivo* et *in vitro* qui recherchaient des mécanismes possibles étaient très hétérogènes et les résultats obtenus mettaient en avant une absence d'effets génotoxiques et mutagènes des champs. Le rapport d'expertise publié par l'Anses en 2010 concluait que « 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]. » Pour sa part, le rapport de l'Anses publié en 2015 s'était concentré sur les effets d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les animaux (de rente, de compagnie et sauvages) sans aborder les effets sanitaires chez l'Homme.

Depuis la parution du rapport d'expertise de l'Anses en 2010, peu d'études ont essayé d'analyser l'effet cancérigène direct des champs sur un modèle animal en laboratoire. La seule étude disponible dans cette période est celle de Qi *et al.*, (2015), qui a exposé dix souris gestantes à un champ de fréquence 50 Hz et d'intensité 50 μ T, 12 h par jour, de la dernière semaine de gestation jusqu'à l'âge de 15,5 mois des souriceaux. Cette publication présente de nombreux problèmes méthodologiques qui ne permettent pas de l'inclure dans la présente analyse. Tout d'abord, les auteurs ne donnent pas d'indication sur la façon dont ils ont réalisé l'exposition, ce qui pose des problèmes de crédibilité des résultats de l'étude. Ensuite, des erreurs dans le traitement statistique des données apparaissent clairement dans les tableaux de présentation des données. Enfin, il existe des incohérences dans le texte, où les valeurs indiquées sont différentes de celles présentées dans les tableaux. Tous ces éléments rendent l'article peu fiable. Par ailleurs, leurs résultats sont en contradiction avec toutes les études précédemment effectuées sur ce thème (revue de Lagroye *et al.*, 2011).

7.1.2 Effets génotoxiques

7.1.2.1 Introduction sur la notion de stress génotoxique

Les agents génotoxiques peuvent agir de façon directe ou indirecte. Dans le premier cas, l'agent attaque directement l'ADN, sans étape intermédiaire. C'est l'exemple de certains polluants chimiques qui, de par leurs propriétés physicochimiques, peuvent réagir chimiquement avec les constituants de l'ADN. Pour les agents physiques (UV, rayonnements ionisants), c'est l'énergie associée à cet agent qui est suffisante pour rompre certaines liaisons chimiques maintenant l'intégrité de la double hélice d'ADN. En ce qui concerne les champs électromagnétiques basses fréquences, l'énergie associée à ces ondes n'est pas suffisante pour provoquer directement des cassures, ou pour induire des réactions chimiques au niveau de l'ADN (Icnirp, 1998). À l'heure actuelle, aucun mécanisme connu ne soutient l'hypothèse d'un effet direct des champs électromagnétiques sur l'ADN. L'hypothèse d'un effet génotoxique de ces ondes ne peut donc être appréhendée que *via* un effet indirect. Dans le cadre de cette hypothèse, il est possible de postuler que les champs n'altèrent pas l'ADN, mais agissent sur d'autres molécules ou fonctions cellulaires qui sont en relation avec le maintien de l'intégrité des génomes. Par exemple, il a été suggéré que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences interfère avec certaines enzymes impliquées dans la réparation de l'ADN et diminue leur activité biologique. Dans ce cas, les champs pourraient aggraver l'effet d'autres agents génotoxiques directs, c'est ce qu'on appelle la co-génotoxicité. Une autre hypothèse a souvent été avancée, qui postule que l'exposition aux champs serait susceptible d'augmenter le stress oxydant intracellulaire. Ceci aurait pour conséquence la création de radicaux libres ou d'espèces réactives oxygénées qui ensuite amplifierait le taux naturel de lésions oxydatives de l'ADN.

On peut se référer aux précédentes expertises de l'Anses sur les radiofréquences (Afsset 2009 et Anses 2013) pour plus de détails, notamment concernant les techniques d'analyse utilisées dans ce domaine de recherches.

7.1.2.2 Publications sur l'effet génotoxique ou co-génotoxique des champs électromagnétiques basses fréquences

➤ **Études *in vitro***

Focke *et al.*, ont publié en 2010 une étude *in vitro* réalisée sur des fibroblastes humains issus de donneurs d'âges différents. Les cellules ont été exposées à 50 Hz, de façon continue ou par intermittence (5 min *on* / 10 min *off*), pendant 15 h et à une puissance élevée (1 mT). La génotoxicité est évaluée grâce au test des comètes. Les auteurs ont observé un effet génotoxique de faible ampleur des ondes basses fréquences, lorsque l'exposition était réalisée par intermittence (contrairement aux expositions continues qui n'avaient pas d'effet). Par ailleurs, ces auteurs rapportent que cet effet génotoxique dépend aussi du statut prolifératif des cellules. Les cellules doivent être en division, ce qui suggère une action sur la réplication, plutôt qu'un dégât direct sur l'ADN. Pour confirmer cette hypothèse, les auteurs ont réalisé un contrôle positif en traitant les cellules au peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) pour induire un stress oxydant. Avec ce contrôle positif, ils obtiennent des effets génotoxiques ayant une signature différente de ce qu'ils obtiennent avec le champ basse fréquence, ce qui laisse supposer que le stress oxydant n'est pas à l'origine des effets des champs. On peut signaler que les auteurs ont également recherché l'effet du seul champ électrique. L'absence d'effet lors de cette expérience suggère que l'effet génotoxique observé est sans doute dû au champ magnétique.

L'équipe de J. Naarala a publié 3 articles sur le sujet. Luukkonen *et al.*, (2011) ont, tout d'abord, réalisé une étude *in vitro* sur une lignée de neuroblastomes humains (SH-SY5Y) afin de rechercher les effets co-génotoxiques d'une pré-exposition aux champs électromagnétiques (50 Hz à 100 µT, pendant 24 h) avant traitement par différents agents génotoxiques connus. Après avoir observé que l'exposition seule aux champs n'avait pas d'impact sur les niveaux de dommages à l'ADN, analysés grâce aux tests des comètes et à celui des micro-noyaux, ces auteurs ont décrit une augmentation variable des dommages à l'ADN suivant le type de molécule génotoxique utilisée (ménadione ou méthyl methanesulphonate (MMS) seul), ce qui peut être vu

comme un contrôle positif validant la méthodologie employée. Un effet co-génotoxique a été obtenu quand les cellules sont traitées à la ménadione, mais pas avec le MMS. Les auteurs avancent l'hypothèse d'un lien avec la fragmentation apoptose-dépendante de l'ADN, et non avec un stress oxydatif. À la suite de ce travail, un 2^{ème} article a été publié en 2014 (Luukkonen *et al.*, 2014). Les auteurs utilisent le même protocole que précédemment, avec des cellules SH-SY5Y (une lignée de neuroblastomes humains) pré-exposées pendant 24 h à 100 μ T (à 50 Hz), puis traitées pendant 3 h à la ménadione. Contrairement à l'étude précédente, des tests biologiques sont ensuite réalisés plusieurs jours après ces traitements, afin de vérifier si ces co-expositions induisent ou non une instabilité génétique. Les cellules pré-exposées aux champs montrent une augmentation du nombre de micronoyaux, 8 ou 15 jours après le traitement à la ménadione. Dans cette étude, d'autres mesures de paramètres biologiques ont été réalisées immédiatement après l'exposition. Ainsi, la mesure d'espèces réactives de l'oxygène, grâce à une sonde fluorescente, montre un effet inhibiteur de la ménadione et une absence d'effet de la part des champs électromagnétiques basses fréquences. Les niveaux de superoxyde mitochondriaux augmentent sous l'effet du traitement à la ménadione, alors qu'on a seulement une tendance à la hausse non significative avec l'exposition aux champs. En revanche, 15 jours après la co-exposition, une augmentation du niveau des espèces réactives de l'oxygène et de la peroxydation des lipides sont de nouveau observés si les cellules ont été pré-exposées aux champs. Les auteurs interprètent leurs résultats comme la preuve que les champs électromagnétiques basses fréquences affectent les processus d'oxydation, ce qui induirait un déséquilibre dans la balance oxydative de la cellule et favoriserait une instabilité génomique en présence de ménadione. Enfin, Kesari *et al.*, (2015), en utilisant le même modèle cellulaire, ont complété cette étude en étendant le temps de récupération à 45 jours après l'exposition aux champs. Le même protocole expérimental que Luukkonen *et al.*, 2014 a été utilisé. La présence de micronoyaux, d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et de lipides peroxydés a ensuite été recherchée 15, 30 et 45 jours après l'exposition. En accord avec leur précédente étude, les auteurs retrouvent une augmentation du nombre de micronoyaux 15 et 30 jours après le traitement. En revanche, 45 jours après l'exposition, cette augmentation n'est plus observée. Le traitement des cellules avec un antioxydant (N-acétylcystéine) n'a aucun impact, ce qui suggère que l'augmentation des espèces réactives de l'oxygène n'est pas la cause primaire de l'effet des champs sur l'instabilité génomique.

Le groupe de Del Re a publié 2 articles sur un modèle cellulaire humain. Del Re *et al.* (2012) ont réalisé une étude *in vitro* en utilisant une lignée recombinante (cellules BE(2)C), issue de neuroblastomes humains, qui possède un gène rapporteur pour étudier la rétro-transposition (déplacement des éléments mobiles du génome). Comme le phénomène de rétro-transposition nécessite une étape de cassures double-brin, les foci H2AX γ ont également été analysés. Les auteurs observent une diminution du nombre d'évènements de rétro-transposition, corrélée avec une diminution du nombre de foci H2AX γ . Ce travail a été poursuivi en renforçant l'analyse des aspects génotoxiques. Giorgi *et al.* (2014) ont utilisé le même modèle cellulaire et le même mode d'exposition (50 Hz en mode pulsé et à une intensité de 1 mT), et les cellules ont été exposées pendant 1 h, 24 h, 48 h ou 72 h. En contrôle positif, les cellules ont été traitées au peroxyde d'hydrogène (H₂O₂), et des expériences de co-exposition avec les champs (BF + H₂O₂) ont également été menées en parallèle de l'étude des effets des champs électromagnétiques basses fréquences seuls. La viabilité cellulaire a été analysée par cytométrie de flux et par un test de dosage de la succinate déshydrogénase mitochondriale (test MTT). Les dommages à l'ADN ont été évalués par l'analyse de la phosphorylation du variant histone H2AX γ (comptage des foci). L'exposition aux champs n'induit pas de baisse de viabilité, ni n'augmente le taux de foci H2AX γ , ce dernier point étant en opposition avec leur précédent résultat. Il faut noter que l'exposition n'augmente pas non plus l'effet délétère du stress oxydant induit par H₂O₂.

Le groupe de Y.-S. Lee a publié 3 articles sur le thème de la génotoxicité. En 2012, Jin *et al.* ont exposé des fibroblastes de souris (NIH3T3) ou une lignée de cellules épithéliales humaine (WI-38) à un champ magnétique uniforme de 1 mT et 60 Hz, pendant 4 h. Les effets de l'exposition sur l'ADN ont aussi été analysés en combinaison avec des agents génotoxiques connus (rayonnements ionisants à 2 Gy, ou traitement au peroxyde d'hydrogène). L'impact de la transformation cellulaire par un oncogène a également été vérifié. L'exposition aux champs

électromagnétiques basses fréquences n'a pas induit de formation de micronoyaux, et n'a pas abouti à un effet additif particulier lors des expériences de co-expositions. En 2014, la suite de cette étude a été publiée (Jin *et al.*, 2014). L'étude *in vitro* a été réalisée sur différents types de lignées cellulaires, avec le même mode d'exposition, et avec une durée d'exposition prolongée (16 h). Comme précédemment, des contrôles positifs ont été réalisés (rayons gamma à 0,2, 0,5, 1, 5 Gy, ou H₂O₂ à 0,5, 10, 50, 100 µM pendant 1 h). De plus, pour mimer des conditions d'activation oncogénique, des transfections ont également été réalisées pour surexprimer l'oncogène c-myc. Cette fois-ci, les dégâts à l'ADN ont été analysés par le test des comètes. L'exposition aux champs n'a pas d'impact sur les cassures d'ADN, quelles que soient la lignée, la durée d'exposition (4 ou 16 h), ou les conditions de co-expositions. L'équipe a prolongé cette étude (Yoon *et al.*, 2014) en exposant les cellules en culture à des champs de plus forte intensité (1 et 2 mT – 60 Hz pendant 6 h). Le même protocole que précédemment a été utilisé et les auteurs ont cette fois-ci analysé les dommages à l'ADN en comptant les foci H2AX γ . Comme publié antérieurement, les effets d'une exposition à 1 mT ne sont pas significatifs ; mais à 2 mT, une augmentation du nombre de foci H2AX γ a été mesurée, ce qui témoigne d'une réparation de l'ADN suite à une cassure double brin. De plus, l'exposition à 2 mT potentialise l'effet génotoxique des rayons gamma, mais pas celui du peroxyde d'hydrogène.

Un autre groupe a effectué une étude sur des lymphocytes humains (Cho *et al.*, 2014). Les chercheurs ont réalisé des cultures primaires, à partir d'un donneur unique, mais avec plusieurs prélèvements effectués. Les cellules ont été traitées au Gadolinium (Gd), un agent contrastant utilisé en IRM. Le but de l'étude était d'évaluer la cytotoxicité et la génotoxicité de cet agent en co-exposition avec un champ électromagnétique basse fréquence (60 Hz, 0,8 mT). Après 12 à 72 h d'exposition, la cytotoxicité a été évaluée en analysant la viabilité cellulaire (test au bleu de trypan) et la formation de ROS. Pour évaluer la génotoxicité, les tests des comètes et des comptages de micronoyaux ont été effectués. Par lui-même, le traitement au Gd diminue la viabilité cellulaire, augmente la production de ROS et les dommages à l'ADN de façon temps- et concentration-dépendant. L'exposition aux champs électromagnétiques seule n'a pas d'effet sur la viabilité, n'induit pas de micronoyaux et n'augmente que très légèrement le taux de cassures détecté par le test des comètes. À l'inverse, l'exposition aux champs potentialise systématiquement les effets néfastes du Gd.

Duan *et al.* (2015) ont comparé l'impact d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à l'exposition aux radiofréquences. Une lignée cellulaire dérivée de spermatozoïdes a été exposée pendant 24 h à différents niveaux d'induction magnétique (1, 2 ou 3 mT). Ensuite, un test des comètes et une analyse des foci H2AX γ ont été effectués. L'exposition aux champs n'a pas d'impact sur la viabilité cellulaire, et seule la plus forte intensité (3 mT) induit des dégâts à l'ADN. Un test des comètes particulier, spécifique des altérations oxydatives des bases de l'ADN (*formamidopyrimidine DNA glycosylase (FPG)-modified comet assay*) a été utilisé, et l'absence d'effet observé laisse supposer que le mécanisme d'action des champs électromagnétiques basses fréquences ne passe pas par un stress oxydatif, contrairement à ce que semble indiquer leurs résultats avec les radiofréquences de forts niveaux d'exposition.

➤ Études *in vivo*

Durant cette période, l'équipe de Mariucci a publié 2 articles sur le sujet. Le premier (Mariucci *et al.*, 2010) correspond à une étude *in vivo* sur des souris CD1 mâles adultes exposées à une intensité de 1 mT (à 50 Hz). Les animaux ont été répartis en plusieurs groupes pour évaluer l'effet de plusieurs durées d'exposition (15 h / jour pendant 1 ou 7 jours). Après exposition, les animaux ont été soit immédiatement mis à mort⁵⁸, soit laissés 24 h au repos avant. Ensuite, un test des comètes a été réalisé sur les cellules isolées de différentes parties du cerveau. Quand le test a été réalisé juste après l'exposition, les auteurs ont trouvé un taux de cassures de l'ADN plus élevé,

⁵⁸ Ce terme est utilisé dans le Décret n° 2013-118 du 1er février 2013 relatif à la protection des animaux utilisés à des fins scientifiques.

quelle que soit la zone du cerveau où les cellules ont été prélevées. En revanche, 24 h après l'arrêt de l'exposition aux champs basses fréquences, ces dommages ne sont plus observables, ce qui laisse supposer qu'ils étaient transitoires et qu'ils ont été réparés *in vivo* par les systèmes cellulaires de réparation de l'ADN. Cette étude a été prolongée en modifiant les intensités des champs. Ainsi, Villarini *et al.*, (2013) ont exposé 96 souris CD1 mâles adultes. Les animaux ont été répartis en plusieurs groupes de façon à tester plusieurs niveaux d'induction magnétique (100 μ T, 200 μ T, 1 mT, 2 mT), l'exposition étant continue pendant 7 jours (15 h / j). Des animaux contrôles ont été soumis aux mêmes conditions, à l'exception de la présence d'ondes. Les animaux ont été mis à mort immédiatement après exposition, ou après une période de récupération de 24 h. De petites portions de cerveau (cortex-striatum, hippocampe et cervelet) ont été prélevées pour analyser les niveaux d'HSP70 (une protéine de choc thermique) et les dommages à l'ADN, grâce au test des comètes. Les auteurs trouvent une augmentation du nombre de cassures à l'ADN, mais uniquement aux intensités les plus élevées (≥ 1 mT). De plus, comme constaté précédemment, ces lésions ne sont plus observables 24 h après l'exposition.

Okudan *et al.*, (2010) ont réalisé une étude sur 120 souris *Swiss* séparées en 6 groupes comportant autant de mâles que de femelles, pour rechercher les effets éventuels des champs électromagnétiques basses fréquences sur la structure des cellules et sur l'organisation du noyau. Cinq conditions d'exposition (0, 1, 2, 3, 4 et 5 μ T) ont été utilisées. Les animaux ont été exposés pendant 40 jours dans un appareil développé par les auteurs, dont la description a été publiée précédemment. Les paramètres mesurés sont la taille des noyaux et des nucléoles, le nombre de lymphocytes micronucléés et d'érythrocytes avec micronoyaux. Les données présentées par les auteurs suggèrent que l'exposition aux champs entraîne une diminution de l'aire des noyaux, de manière non linéaire avec un effet le plus marqué à 1 μ T. À 1 μ T, les auteurs observent également une diminution marquée de la taille des nucléoles (appelés AgNOR), mais cet effet n'est pas proportionnel à l'intensité de l'exposition. Les résultats de ces manipulations sont complexes, avec des effets en dents de scie. De plus, une variabilité liée à la technique de détection ne peut pas être exclue, car celle-ci est difficile à mettre en œuvre (Lindner 1993). L'exposition n'a aucun impact sur le nombre de lymphocytes ou d'érythrocytes micronucléés, aussi les auteurs concluent que les ondes n'ont pas d'effet génotoxique et qu'un mécanisme permettant d'expliquer l'augmentation des risques de leucémies chez l'enfant doit être cherché ailleurs. En conclusion, ce type de manipulation mériterait d'être reproduit, car c'est une des rares études cherchant des effets après des expositions de faibles intensités (1 à 5 μ T).

Rageh *et al.* (2012) ont exposé des rats Wistar nouveau-nés à un champ magnétique à 5 Hz, d'intensité 0,5 mT pendant 30 jours (n = 10 pour chaque condition : exposition factice ou exposition réelle). Les dommages à l'ADN ont été évalués dans les cellules isolées du cerveau et dans les cellules de la moelle osseuse, respectivement par la technique du test des comètes et le comptage des micronoyaux. Dans les deux cas, on peut regretter que les auteurs n'aient pas fait leurs analyses d'images en aveugle. L'impact de l'exposition sur le stress oxydant a également été investigué. Avec le test des comètes, les auteurs ont trouvé une augmentation significative du nombre de cassures d'ADN dans les cellules du cerveau. Au niveau de la moelle osseuse, le nombre de micronoyaux et l'index mitotique augmentent aussi dans le groupe des animaux exposés. En parallèle, la même équipe a publié une étude sur des rats mâles adultes (El-Gebaly *et al.*, 2012). Deux groupes de 10 animaux ont été utilisés : un groupe d'exposition factice (*sham*) et un groupe d'exposition réelle (50 Hz et 0,5 mT pendant 30 jours de façon continue). Après exposition, des cellules du sang, de la moelle osseuse, du foie et de la rate ont été prélevées sur 6 animaux par groupe. Sur les cellules de la moelle osseuse, les auteurs ont observé une augmentation significative du nombre de micronoyaux, ainsi qu'une diminution du nombre d'érythrocytes polychromatiques. En revanche, ils n'ont pas mis en évidence de dommages primaires à l'ADN. Pour cette dernière partie de l'étude, on peut regretter que le test ait été fait sur les cellules du foie et de la rate, et non pas sur les cellules de la moelle. De plus, la technique employée (visualisation de l'ADN fragmenté sur gel d'agarose après purification) est assez peu résolutive et sujette à des artefacts.

Alcaraz *et al.* (2014) ont mené une étude sur des souris mâles adultes. Les animaux (168 souris *Swiss* âgées de 9 à 12 semaines) ont été exposés de façon continue à un champ

électromagnétique basse fréquence (50 Hz, 200 μ T), pendant 7, 14, 21 et 28 jours (6 animaux par groupe). Après exposition, les animaux ont été mis à mort et la moelle osseuse récupérée. La présence de micronoyaux dans les érythrocytes a été analysée en double aveugle. Une augmentation du nombre de micronoyaux a été observée dans tous les groupes exposés. Traiter les animaux avec des antioxydants (diméthyl sulfoxyde (DMSO), 6-n-propyl-2-thiouracil (PTU), procyanidines extraits de raisin ou flavonoïdes extraits de citron) diminue les dommages dus aux rayons-X (contrôle positif), mais pas ceux induit par l'exposition aux champs. Ceci laisse supposer que le stress génotoxique observé n'a pas pour origine un stress oxydant.

La publication de Korr *et al.* (2014) correspond à une étude *in vivo*, menée sur 86 souris mâles adultes de souche Hannover. Les animaux ont été répartis en trois groupes de 26 à 30 et ont été exposés de façon continue à 2 intensités différentes (0,1 mT et 1 mT), en plus de l'exposition factice. Après une exposition de 8 semaines, dix souris de chaque groupe ont reçu une injection de thymidine tritiée (3 H-TdR), puis 115 min après l'injection, les animaux ont été mis à mort et les organes prélevés (cerveau, reins, foie). Après fixation, des lames histologiques ont été réalisées et l'incorporation de la thymidine tritiée quantifiée (le taux d'incorporation de cette molécule étant le reflet de la réparation de l'ADN nucléaire dans les cellules quiescentes, ou la synthèse/réparation de l'ADN dans les mitochondries). Aucune modification du taux d'incorporation de 3 H-TdR n'a été observé dans les noyaux, à part une légère diminution à 1 mT, dans les cellules épithéliales du 4^{ème} ventricule du cerveau, et dans les cellules épithéliales du conduit cortical du rein. Les auteurs ont aussi observé une diminution de la synthèse d'ADN dans les mitochondries de neurones dans certaines zones du cerveau. Il faut noter qu'avec cette étude, les auteurs ne confirment pas les résultats obtenus en 2004, mais les conditions d'exposition ont changé (ils ont utilisé des intensités de champs plus faibles < 1,5 mT). Les auteurs concluent que l'exposition prolongée de souris à des intensités à la limite des valeurs limites autorisées pour les travailleurs (1 mT) peut entraîner, suivant les aires cérébrales, de légères modifications dans les niveaux de néosynthèse d'ADN mitochondrial. Aucun mécanisme précis n'est proposé pour expliquer ces observations.

Dans l'étude de Wilson *et al.* (2015), les auteurs ont évalué l'impact de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'induction de mutations dans l'ADN des cellules germinales (sperme) ou des cellules sanguines. Des souris mâles CBA/CA et BALB/c et hybrides de 7 semaines ont été exposées à plusieurs niveaux de champs magnétiques (50 Hz à 10, 100 ou 300 μ T) pour des durées de 2 ou 15 h (5 animaux par groupe). L'exposition se fait dans un appareil développé par les auteurs dont la description est bien détaillée. L'appareil est (partiellement) protégé des champs extérieurs et les valeurs de champs sont contrôlées (avec une incertitude de 5 %). Les tissus (sang et testicules) sont prélevés 12 semaines après exposition pour s'assurer de la production de sperme dérivant de cellules exposées aux rayonnements. La fréquence d'apparition des mutations a été analysée sur le locus Ms6-hm qui possède des séquences répétées en tandem (*Expanded Simple Tandem Repeat* - ESTR). Une approche PCR (*single-molecule PCR*) a été utilisée de façon à identifier le nombre de répétitions pour chaque allèle. Pour estimer la fréquence de mutation, une moyenne de 135 molécules d'ADN a été analysée pour chaque type cellulaire et pour chaque animal. Comme contrôle positif, la fréquence de mutation a aussi été quantifiée après une exposition aux rayons-X (1 Gy). Les auteurs n'ont pas trouvé d'augmentation significative de la fréquence de mutation sous exposition aux champs, excepté dans le sperme, mais de façon non dépendante de la dose. Les auteurs concluent que l'impact mutagène des champs électromagnétiques basses fréquences semble être mineur, sinon négligeable.

L'équipe de P. Jeggo a publié 2 études portant sur l'impact des champs électromagnétiques basses fréquences sur les fœtus, en exposant des souris gestantes. Saha *et al.* (2014) ont exposé les mères soit à des rayons X (250 kV ; 4,9 mGY / min à 10, 25, 50, 100 or 200 mGy), soit à un champ basse fréquence à 50 Hz d'intensité 100 ou 300 μ T. L'exposition aux champs a été brève (pendant 2 h ou 15 h), ce qui a permis d'exposer les fœtus à un stade précis de leur développement : jour 12,5 après la fécondation (E12,5) pour l'exposition à 300 μ T et jour 13,5 (E13,5) pour l'exposition à 100 μ T et aux rayons X. Après exposition, les animaux ont été mis à mort et la tête des fœtus récupérées pour analyse en immunocytochimie sur des coupes. Les cassures d'ADN sont estimées par une analyse TUNEL et en comptant les foci de 53BP1. Aucun

effet des champs n'a été détecté. Des contrôles positifs ont été réalisés pour lesquels les auteurs trouvent une augmentation du nombre de cassures et de cellules en apoptose chez les embryons exposés à plus de 10 mGy en rayons X. L'article publié par Woodbine *et al.* (2015) fait suite à cette étude. Après avoir analysé l'impact de l'exposition aux champs basses fréquences seuls, l'équipe s'est ensuite intéressée au problème de la co-génotoxicité. Des souris gestantes avec leurs fœtus au stade E13,5 ont été exposées à un champ magnétique (50 Hz, 300 μ T) pendant 3 heures. L'exposition a été réalisée avant ou après une exposition aux rayons X à 100 mGy, ce qui induit de nombreuses cassures au niveau du génome des cellules. Le but de cette expérience était de voir si l'exposition au champ peut influencer la réparation de l'ADN après cassure double-brin. Le même protocole que celui décrit par Saha *et al.* (2014) a été utilisé pour quantifier les cassures grâce à la détection immunologique des foci 53BP1. Les auteurs montrent par cette expérience que l'exposition aux champs basse fréquence n'a pas d'impact sur la réparation de l'ADN dans les cellules souches neurales des fœtus.

Une autre étude, réalisée par une équipe italienne, s'est également penchée sur le cas des fœtus. Udroui *et al.* (2015) ont exposé de façon continue (24 h par jour pendant 30 jours) des souris gestantes à un champ électromagnétique de fréquence 50 Hz et d'intensité 65 μ T. Pour les embryons, l'exposition a commencé au stade E11,5, elle a donc continué pendant 3 semaines après la naissance. En plus du groupe contrôle non exposé, 2 autres groupes contrôle ont été réalisés : l'un avec des animaux qui ont été irradiés aux rayons X (1 Gy) et un dernier où les animaux ont subi les 2 traitements (rayons X et champ basse fréquence). Après la naissance, l'état de santé des souriceaux a été suivi et du sang a été prélevé à la naissance (jour 1), 11 jours après (soit en cours d'exposition au champ magnétique), 21 jours après (soit à la fin de la période d'exposition), puis 42 et 140 jours après la naissance (soit 21 et 119 jours après l'arrêt de l'exposition, respectivement). Un test des micronoyaux a été effectué sur les cellules sanguines (érythrocytes). Les résultats montrent une légère augmentation du nombre de micronoyaux après exposition au champ, pour le prélèvement à 42 jours seulement. Les auteurs concluent que l'effet génotoxique ne peut être visualisé que si l'exposition est suffisamment longue, mais dans ce cas il est étonnant que le nombre de micronoyaux ne soit pas aussi augmenté avec l'échantillon prélevé à 21 jours (soit à la toute fin de la période d'exposition). Quoi qu'il en soit, cet effet est transitoire car le prélèvement à 140 jours ne présente pas de différence avec le groupe contrôle. On peut aussi noter que cette expérience n'a pas pu montrer d'effet modulateur des champs basses fréquences sur l'effet génotoxique des rayons X. Un test des comètes a également été réalisé sur le sperme présent dans l'épididyme. Pour cela, les animaux ont été mis à mort soit 42 jours, soit 140 jours après la naissance. Le test des comètes sur les cellules du sperme n'a pas montré d'effet dommageable de l'exposition aux champs. Au contraire, l'exposition au champ magnétique basse fréquence semble protéger des effets délétères des rayons X.

➤ Cas des études cliniques

Une étude a été menée par Gadhia *et al.* (2010) pour rechercher la présence d'altérations chromosomiques chez les conducteurs de train. Ce personnel est exposé à des densités de flux de champ magnétique relativement élevées, car ils sont à proximité du moteur et des lignes d'alimentation. Cependant, dans cette publication, les niveaux d'exposition n'ont pas été évalués. Les résultats obtenus chez 15 conducteurs de train (groupe exposé) ont été comparés à 15 contrôleurs qui constituent le groupe contrôle (apparié en âge, conditions socio-économiques et habitudes). Dans cette étude, les auteurs ont prélevé le sang des volontaires et effectué une analyse cytologique pour rechercher d'éventuels échanges de chromatides sœurs ou des aberrations chromosomiques structurales. Cette étude n'a révélé aucun dommage cytogénétique accru chez les conducteurs de train. Les auteurs concluent que ces résultats ne supportent pas l'hypothèse selon laquelle l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences peut exercer un effet génotoxique chez les personnes exposées.

L'équipe de M. Moretti en Italie a publié 2 articles sur les soudeurs qui sont exposés à des champs particulièrement élevés. Dans une première étude, Dominici *et al.* (2011) ont recruté des sujets sains volontaires (21 soudeurs et 21 personnes contrôles appariées en âge, lieux de résidence et habitudes tabagiques). Pour estimer le niveau d'exposition des soudeurs, ces derniers ont porté un

dosimètre individuel sur leur lieu de travail pendant une semaine. Les intensités des champs mesurées sont très hétérogènes, elles varient de 0,03 à 345 μT suivant les moments de la journée et la proximité avec les appareils de soudage. Dans cette étude, les effets cytogénétiques ont été examinés au moyen du test des micronoyaux et de la détection d'échanges de chromatides sœurs, dans les lymphocytes des volontaires. Les résultats des tests des comètes effectués sur les lymphocytes de ces personnes ont été publiés séparément (Villarini *et al.*, 2015). Le groupe de soudeurs a présenté plus de cellules micronucléées que le groupe contrôle. La fréquence des micronoyaux a également été analysée par rapport à l'exposition au champ magnétique dans le milieu de travail. Les employés qui étaient dans l'entreprise où les intensités des champs étaient les plus fortes, sont également les personnes qui présentent le plus fort taux de micronoyaux. De façon intrigante, les auteurs ont observé une diminution significative de la fréquence des échanges de chromatides sœurs dans le groupe exposé. De même, avec le test des comètes, les auteurs ont observé une diminution des dommages à l'ADN dans le groupe des soudeurs. Les résultats présentés sont donc contradictoires. Suivant la méthode utilisée, ils suggèrent soit un environnement génotoxique accru pour les soudeurs (test des micronoyaux), soit un environnement protecteur (test des comètes et des échanges de chromatides sœurs). Pour expliquer une telle divergence, les auteurs émettent l'hypothèse d'un environnement complexe contenant de multiples facteurs délétères. Ils soupçonnent les soudeurs d'être, de par leur activité, exposés à des vapeurs de métaux qui pourraient aussi altérer l'ADN (cassures ou liaisons intempestives suivant les concentrations) et donc affecter les résultats suivant le type de tests utilisés. De ce fait, l'approche utilisée ne peut donner des résultats fiables quant à l'implication réelle de l'exposition aux champs basses fréquences sur l'intégrité de l'ADN de cette catégorie de travailleurs.

Dans leur étude, Balamuralikrishnan *et al.* (2012) ont recruté 70 sujets volontaires travaillant dans une entreprise de transport d'électricité (180 kV – 420 kV), dont 50 étaient professionnellement exposés à des champs basses fréquences depuis une longue période et 20 servaient de contrôles. Les 50 sujets exposés ont été divisés en deux groupes : un groupe de travailleurs directement exposés aux lignes haute-tension ou aux transformateurs (28 personnes), et un groupe de personnels de bureau (chef, employé, secrétaire, *etc.*) travaillant dans la même entreprise, à proximité de la sous-station électrique, mais n'étant pas directement exposés aux champs de forte intensité (22 employés). Les 20 personnes formant le groupe contrôle sont appariées en âge et en habitude tabagique et n'ont jamais occupé d'emplois connus pour générer des expositions particulières aux champs électromagnétiques. Une prise de sang a été effectuée sur les sujets et les dommages à l'ADN ont été analysés grâce au test des micronoyaux et grâce à une analyse cytogénétique pour rechercher des aberrations chromosomiques. Les lymphocytes des sujets directement exposés présentent un taux d'aberrations chromosomiques et de micronoyaux significativement plus élevé que les lymphocytes des sujets témoins. Selon les auteurs, l'exposition professionnelle chronique aux champs électromagnétiques basses fréquences peut entraîner un risque accru de dégâts à l'ADN chez les travailleurs les plus fortement exposés. Il faut souligner que cette étude a été critiquée par Maes et Verschaeve car les taux de micronoyaux enregistrés chez les témoins sont anormalement bas, ce qui expliquerait la différence significative constatée avec le groupe des travailleurs directement exposés (Maes et Verschaeve, 2016). Les niveaux trouvés chez les électriciens étaient en fait dans l'ordre de grandeur des variations possibles dans la population normale (Bonassi *et al.*, 1995).

Tiwari *et al.* (2015) ont recruté 293 volontaires qui ont été répartis en 2 groupes. Le groupe exposé était constitué de 142 personnes fréquemment exposées aux champs électromagnétiques basses fréquences émis par des sous-stations de 132 kV (les niveaux réels d'exposition aux champs ne sont pas donnés). Le groupe contrôle était constitué de 151 personnes appariées en âge et en statut socio-professionnel avec le premier groupe. Une prise de sang a été effectuée et, pour chaque échantillon, des dosages de l'adrénaline circulant et de certains marqueurs de stress oxydatif ont été pratiqués. Un test des comètes a été réalisé pour évaluer les dommages à l'ADN. Les auteurs indiquent une « tendance » à une augmentation des dommages à l'ADN chez les sujets exposés par rapport aux témoins non exposés. Cependant, la signification statistique n'a

pas été indiquée dans la publication et le différentiel est tellement faible qu'il est peu probable que l'effet génotoxique soit significatif.

7.1.2.3 Conclusions sur l'effet génotoxique

Tout d'abord, il faut souligner que les études *in vivo* et *in vitro* réalisées ont généralement utilisé des intensités de champ élevées (entre 100 et 3 000 μ T pour 90 % d'entre elles), peu en rapport avec les niveaux d'exposition rencontrés par le grand public. Le seul article utilisant des niveaux de l'ordre du microtesla (Okudan *et al.*, 2010) n'a pas trouvé d'effet génotoxique. Plusieurs études ont mis en évidence une génotoxicité pour des niveaux de champs approchant, ou dépassant, le millitesla (Mariucci *et al.*, 2010 ; Villarini *et al.*, 2013 ; Yoon *et al.*, 2014 ; Korr *et al.*, 2014 ; Duan *et al.*, 2015), niveaux qui peuvent se rencontrer dans certains postes de travail industriels. Certaines études *in vivo* trouvent parfois un effet génotoxique, pour des niveaux inférieurs au millitesla (200 ou 500 μ T), mais avec des expositions prolongées (Rageh *et al.*, 2012 ; Alcaraz *et al.*, 2014). À quelques exceptions près, les différences observées entre les échantillons contrôles et les échantillons exposés sont souvent de faibles ampleurs. Ceci avait déjà été relevé par Vijayalaxmi et Prihoda (2009) lors d'une méta-analyse. Ces auteurs estimaient même que les indices de génotoxicité trouvés étaient semblables aux indices « spontanés » rapportés dans les bases de données historiques. Il faut aussi noter que plusieurs études ont décrit une absence de génotoxicité avec les champs seuls, mais ont trouvé un effet co-génotoxique si le modèle biologique était co-exposé avec un agent chimique (Luukkonen *et al.*, 2011, 2014 ; Kesari *et al.*, 2015 ; Cho *et al.*, 2014). La nature de cet agent semble primordiale pour observer cet effet co-génotoxique.

Il ressort que dans certaines conditions d'exposition, une augmentation statistiquement significative des dommages à l'ADN peut être parfois observée. Toutefois, ces résultats ont souvent été obtenus avec des valeurs de champs 1 000 à 10 000 fois plus élevés que les niveaux trouvés dans l'environnement général. Il est donc difficile de relier les résultats obtenus à un possible mécanisme pouvant expliquer le risque de leucémie chez l'enfant, d'autant plus que la plupart des modèles biologiques utilisés dans les études sur la génotoxicité sont sans rapport avec cette pathologie.

Tableau 24 : synthèse des études *in vitro* concernant le stress génotoxique

Études <i>in vitro</i>				
Références	Modèle biologique	Exposition	Tests biologiques effectués	Effets observés
Luukkonen <i>et al.</i> , 2011 Luukkonen <i>et al.</i> , 2014 Kesari <i>et al.</i> , 2015	Lignée SH-SY5Y	50 Hz – 100 μ T Durée : 24 h	Test des comètes Test des micronoyaux	Aucun dommage à l'ADN si champ seul, mais effet génotoxique possible en co-exposition avec la ménadione.
Cho <i>et al.</i> , 2014	Culture primaire de lymphocytes humains	60 Hz – 0,8 mT Durée : 12 à 72 h	Test des comètes Test des micronoyaux	Dommages à l'ADN visualisés par le test des comètes Pas de dégât à l'ADN avec champ seul mais positifs en co-exposition avec le Gadolinium.
Giorgi <i>et al.</i> , 2014	Lignée BE(2)C	Pulses 50 Hz – 1 mT Durée : 1, 24, 48 & 72 h	Comptage des foci H2AX γ	Niveau constant
Jin <i>et al.</i> , 2012	Lignées NIH3T3 & WI-38	60 Hz – 1 mT Durée : 4 h	Test des micronoyaux	Pas d'effet génotoxique avec champ seul et en co-exposition.
Jin <i>et al.</i> , 2014	Lignées NIH3T3 ; WI-38 & MCF10A	60 Hz – 1 mT Durée : 4 & 16 h	Test des comètes	Pas d'effet génotoxique avec champ seul et en co-exposition
Yoon <i>et al.</i> , 2014	Lignées WI-38 & L132	60 Hz – 1 & 2 mT Durée : 6 h	Comptage des foci H2AX γ	Niveau constant à 1 mT Augmentation à 2 mT avec champ seul et en co-exposition
Focke <i>et al.</i> , 2010	Culture primaire de fibroblastes humains	50 Hz – 1 mT Durée : 15 h (de façon continue ou par intermittence)	Test des comètes	Cassures de l'ADN observées.

Études <i>in vitro</i>				
Références	Modèle biologique	Exposition	Tests biologiques effectués	Effets observés
Duan et al., 2015	Lignée GC-2	50 Hz – 1 ; 2 & 3 mT Durée : 24 h	Test des comètes Comptage des foci H2AX γ	Pas de cassures observées à 1 & 2 mT, mais cassures à 3 mT.
Del Re <i>et al.</i> , 2012	Lignée BE(2)C	Pulses 50 Hz – 1 mT Durée : 48 h	Test rétro-transposition Comptage des foci H2AX γ	Diminution du niveau basal. Diminution du niveau basal.

Tableau 25 : synthèse des études *in vivo* concernant le stress génotoxique

Études <i>in vivo</i>				
Références	Modèle biologique	Exposition	Tests biologiques effectués	Effets observés
Okudan <i>et al.</i> , 2010	Souris adultes Organe : cellules sanguines	50 Hz – 1, 2, 3, 4 et 5 μ T Durée : 40 jours (en continu)	Test des micronoyaux	Aucun dommage à l'ADN observé.
Wilson <i>et al.</i> , 2015	Souris adultes Organes : sang et sperme	50 Hz – 10 ; 100 & 300 μ T Durée : 7 semaines	Mutations sur locus riche en séquences répétées (Ms6-hm)	Aucune mutation observée.
Udroiu <i>et al.</i> , 2015	Fœtus et jeunes souris Organes : sang et sperme	50 Hz – 65 μ T Durée : cinétique 30 jours	Test des comètes pour le sperme Test des micronoyaux pour les cellules sanguines	Pas de cassures dans le sperme. Dommages à l'ADN observés dans une fenêtre de temps très étroite.
Villarini <i>et al.</i> , 2013	Souris adultes Organe : cerveau	50 Hz – 0,1 ; 0,2 ; 1 ou 2 mT Durée : 7 jours (15 h / j)	Test des comètes	Pas de cassures à 100 & 200 μ T, mais cassures à 1 & 2 mT.
Saha <i>et al.</i> , 2014	Fœtus de souris Organe : tête	50 Hz – 100 & 300 μ T Durée : 2 h ou 15 h	TUNEL Comptage des foci 53BP1	Aucun dégât à l'ADN observé.

Études <i>in vivo</i>				
Références	Modèle biologique	Exposition	Tests biologiques effectués	Effets observés
Korr <i>et al.</i> , 2014	Souris adultes Organes : cerveau, reins, foie	50 Hz – 100 μ T & 1 mT Durée : 8 semaines	Incorporation de thymidine tritiée pour visualiser la réparation de l'ADN sur coupes histologiques	Aucun dégât à l'ADN observé, sauf dans le 4 ^{ème} ventricule du cerveau et dans l'épithélium du conduit rénal, à 1 mT.
Alcaraz <i>et al.</i> , 2014	Souris adultes Organe : moelle osseuse	50 Hz – 200 μ T Durée : 7, 14, 21 et 28 jours (en continu)	Test des micronoyaux	Stress génotoxique observé.
Woodbine <i>et al.</i> 2015	Fœtus de souris Organe : tête	50 Hz – 300 μ T – en co-exposition avec des rayons X Durée : 2 h ou 15 h	Comptage des foci 53BP1	Aucun dégât à l'ADN observé.
Rageh <i>et al.</i> , 2012	Rats nouveau-nés Organes : cerveau & moelle osseuse	50 Hz – 500 μ T Durée : 30 jours (en continu)	Test des comètes pour les cellules isolées à partir du cerveau Test des micronoyaux pour les cellules de la moelle osseuse	Dégâts à l'ADN observés quel que soit le test et le type cellulaire.
El-Gebaly <i>et al.</i> , 2012	Rats adultes Organes : foie, rate, cellules de la moelle osseuse	50 Hz – 500 μ T Durée : 30 jours (en continu)	Test des micronoyaux pour les cellules de la moelle osseuse Visualisation de l'ADN fragmenté par électrophorèse pour le foie et la rate	Domages à l'ADN observés avec le test des micronoyaux, mais pas avec le test de fragmentation de l'ADN.
Mariucci <i>et al.</i> , 2010	Souris adultes Organe : cerveau	50 Hz – 1 mT Durée : 1 jour ou 7 jours (15 h / j)	Test des comètes.	Dégâts à l'ADN observés si test effectué immédiatement après l'exposition.

7.1.3 Effets sur le stress oxydant

7.1.3.1 Introduction sur la notion de stress oxydant

De par leur activité métabolique, les cellules et les tissus produisent de façon continue des radicaux libres ou des espèces réactives de l'oxygène (appelées ROS pour *Reactive Oxygen Species*). Comme ces molécules sont chimiquement très réactives, il est important qu'elles ne s'accumulent pas dans la cellule, car elles pourraient altérer les protéines, les lipides et l'ADN en les oxydant. Les publications qui traitaient du stress oxydant comme source d'altération de l'ADN ont déjà été analysées dans le paragraphe sur le stress génotoxique, et elles n'ont pas été reprises dans cette partie.

Au niveau cellulaire, il existe des systèmes de défense chargés de neutraliser et d'éliminer ces ROS au fur et à mesure qu'elles sont produites. Parmi ces défenses antioxydantes on peut citer les vitamines E et C, l'ubiquinone, le glutathion réduit, ou des enzymes telles que les superoxydes dismutases (SOD), les catalases (CAT)⁵⁹ et les glutathion peroxydases (GSH-Px). On parle de stress oxydant quand survient un déséquilibre dans cette balance ROS/antioxydants. Cela peut se produire suite à une modification du métabolisme qui peut générer une surproduction de ROS, ou suite à une défaillance des systèmes antioxydants, ce qui limite leur élimination. Le stress oxydant est impliqué dans de nombreuses situations, normales (vieillesse, inflammation) ou pathologiques (cancer, maladies neurodégénératives, pathologies oculaires). La diversité des conséquences du stress oxydant et la variété des maladies liées à ce phénomène en font un acteur incontournable en santé. D'autant plus qu'on sait maintenant que l'environnement (UV, polluants chimiques, métaux lourds) peut induire ce type de stress. Il est donc important de vérifier si les champs basses fréquences peuvent modifier la quantité de ROS dans les cellules ou les organismes exposés.

7.1.3.2 Études sur les biomarqueurs du stress oxydant

➤ **Études *in vitro***

Le groupe de M. Reale a publié 4 articles, très riches en dosages variés, pour évaluer l'impact de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les enzymes de défense antioxydante. Dans une première étude (Patrino *et al.*, 2010), les chercheurs ont exposé des cellules HaCaT (lignée de kératinocytes humains) à un champ 50 Hz d'une intensité de 1 mT, pendant 3 h, 18 h ou 48 h. Pour évaluer l'effet de l'exposition sur le stress oxydant, plusieurs types d'analyses biochimiques ont été réalisés. Par *western-blot*, les auteurs ont montré que l'exposition induit l'expression des enzymes iNOS (*inductible nitric oxide synthase*) et eNOS (*endothelial nitric oxide synthase*), et qu'elle diminue l'expression de la COX-2 (cyclooxygenase-2). Pour la partie *western-blot*, les résultats montrés ne sont pas vraiment nets et convaincants, car certains sont à la limite du bruit de fond, mais des dosages supplémentaires ont été réalisés pour renforcer l'étude. Les activités des enzymes NOS sont nettement augmentées après 3 h d'exposition. Il est intéressant de noter que le différentiel va décroissant après 18 et 48 h d'exposition. Le dosage de l'oxyde nitrique (NO) cellulaire indique une augmentation (pour 3 h d'exposition) qui peut être reliée à l'augmentation de l'expression et de l'activité des enzymes NOS. Les dosages de la prostaglandine 2 (PGE2) et de l'anion superoxyde (O₂⁻) montrent une diminution de leur concentration cellulaire. Les chercheurs ont également mesuré l'activité des catalases et ont trouvé une diminution de leur activité. Les auteurs concluent que les champs basses fréquences ont la capacité de moduler les activités des enzymes NOS, ce qui modifie les niveaux de NO qui sert de médiateur dans les phénomènes d'apoptose, de prolifération ou de différenciation cellulaire. Pour les auteurs, ces résultats mettent en avant le rôle potentiel des champs électromagnétiques basses fréquences en thérapie. Ce travail a été poursuivi et, l'année suivante, la même équipe a

⁵⁹ Pour plus d'informations, se référer aux rapports de l'Anses sur les radiofréquences (Afsset 2009 & Anses 2013), où le stress oxydant et les systèmes de défense cellulaire ont été présentés avec plus de détails.

publié une nouvelle étude sur le même sujet (Patrino *et al.*, 2011). Les auteurs ont comparé les constantes cinétiques des enzymes catalases, iNOS et cytochrome P450 dans 2 lignées différentes : les HaCaT comme précédemment et une nouvelle lignée cellulaire (THP-1) dérivée de cellules leucémiques. Les auteurs se sont aussi placés dans un contexte inflammatoire en traitant, ou non, les cellules au LPS (lipopolysaccharide). Comme précédemment, les cellules ont été exposées à un champ 50 Hz d'intensité 1 mT, pendant un temps variable. Lors de l'exposition aux champs, mais également sous traitement au LPS, les auteurs ont observé une différence des caractéristiques cinétiques des enzymes catalases (CAT) et iNOS. Toutefois, la significativité statistique de ces différences n'est pas indiquée, ni discutée dans l'article. Dans l'article publié par Reale *et al.* (2014), les chercheurs ont changé de modèle biologique : ils ont exposé des cellules SH-SY5 (lignée neuronale humaine) à un champ 50 Hz d'intensité 1 mT, pendant 1, 3, 6 et 24 h. L'exposition ne change ni la morphologie, ni la viabilité des cellules, mais les auteurs ont observé une augmentation de l'activité des enzymes NOS et CAT. Les auteurs ont aussi mesuré une augmentation du taux d'ion O_2^- , résultats d'après eux d'une augmentation de l'activité du cytochrome P450. Les cinétiques d'exposition montrent d'abord une élévation de l'activité des enzymes NOS et de la production de O_2^- . Ceci est compensé au cours du temps par une augmentation de l'activité antioxydante de la catalase. Enfin, ces travaux ont été complétés par une autre publication où les auteurs ont utilisé les mêmes protocoles pour de nouveau analyser l'impact des champs sur ces enzymes, mais cette fois-ci dans une quatrième lignée cellulaire (Patrino *et al.*, 2015a). Pour cette étude, des cellules K562, dérivées de cellules leucémiques humaines, ont été utilisées comme modèle. Lors de l'exposition à un champ 50 Hz (intensité 1 mT pendant 1, 3, 6, 9, 12, 18 et 24 h), les cellules ont été traitées, ou non, au PMA (phorbol 12-myristate 13-acetate), une molécule qui active les phosphokinases C et induit ainsi une production intracellulaire de ROS. Ce traitement peut être considéré comme un contrôle positif validant la méthodologie utilisée. En analysant les propriétés cinétiques des enzymes, les auteurs trouvent une augmentation de l'activité des enzymes CAT et CYP450 sous exposition, alors que l'activité des iNOS diminue. Pris dans leur globalité, cet ensemble d'articles montre que, quel que soit le modèle cellulaire, une exposition à une intensité de 1 mT est capable de modifier l'équilibre oxydatif au sein de la cellule.

Hong *et al.* (2012) ont étudié les effets de l'exposition aux champs sur les niveaux de ROS intracellulaires et sur certaines activités enzymatiques antioxydantes. Pour cela, des cellules épithéliales du sein humain (MCF10A) ont été exposées pendant 4 h à un champ électromagnétique de fréquence 60 Hz et d'intensité 1 mT. Les auteurs n'ont enregistré aucun changement dans le niveau des ROS intracellulaires, ni dans l'activité de la superoxyde dismutase (SOD), ni dans le rapport glutathion réduit / oxydé (GSH / GSSG). Un contrôle positif a été effectué par exposition aux rayonnements ionisants, ce qui, comme attendu, a modifié les trois paramètres étudiés. Il faut toutefois noter que les analyses biochimiques ont été réalisées quelques heures après l'exposition aux champs (10, 24 ou 48 h). Cette stratégie peut être problématique si le déséquilibre induit par l'exposition est transitoire. Dans ce cas, il serait possible que les cellules aient déjà retrouvé leur homéostasie lors de la réalisation des tests de détection.

Un autre groupe a analysé l'impact de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la différenciation neuronale, en prenant comme hypothèse que le mécanisme sous-tendu pourrait mettre en jeu une augmentation de la production de ROS au sein des cellules (Park *et al.*, 2013). Ce travail fait suite à une publication de la même équipe (Cho *et al.*, 2012), où les chercheurs avaient montré que les champs pouvaient, dans certaines conditions, induire la différenciation de cellules souches en cellules de type neuronal, et ceci sans ajout de facteurs de différenciation ou de produits chimiques. Les auteurs ont repris le même protocole et le même type cellulaire (hBM-MS) pour pousser plus loin leurs expériences. Dans cet article, ils ont mesuré les niveaux de ROS et ont pu constater que l'exposition (50 ou 100 Hz, à 1 mT pendant 6 jours pour laisser le temps aux cellules de se différencier) augmente la production intracellulaire de ROS. De façon intéressante, ils ont montré que traiter les cellules avec des produits antioxydants neutralisant les ROS, inhibe la différenciation cellulaire induite par l'exposition au champ basse fréquence. L'exposition augmente également la phosphorylation du récepteur à l'EGF, des kinases PI3K et Akt et du facteur de transcription CREB. Ceci permet d'élaborer un modèle mécanistique

suggérant que la différenciation induite par les champs passerait par une production de ROS, sans doute *via* la NADH oxydase membranaire NOX, qui aurait pour conséquence d'activer le récepteur membranaire à l'EGF. Ce récepteur à son tour activerait les voies de transduction de signal passant par les kinases PI3K/Akt et le facteur de transcription CREB, ce facteur permettant l'activation transcriptionnelle et la synthèse de nouveaux facteurs neurogéniques tels que MAP2, NF-L ou neuroD1. Les auteurs concluent que les basses fréquences facilitent la différenciation des cellules souches mésothéliales (hBM-MSc) et qu'ils ont mis en évidence le mécanisme.

De Groot *et al.* (2014) ont étudié les effets d'une exposition de courte durée (30 min) ou d'une exposition prolongée (48 h) à un champ 50 Hz, sur des cellules PC12 (un modèle de cellules neuronales de rat). Plusieurs niveaux d'exposition ont été utilisés (1, 10, 10 et 1 000 μ T) sur des cellules naïves non traitées ou sur des cellules traitées à la dexaméthasone (un corticostéroïde de synthèse), ou avec des concentrations non cytotoxiques de L-DOPA (un précurseur direct de la dopamine), ou avec du sulfate de fer (FeSO_4) pendant 24 h. De tels traitements sont connus pour élever les niveaux intracellulaires de ROS et pour induire une vulnérabilité accrue des cellules PC12 aux stress environnementaux. Les résultats présentés sont essentiellement centrés sur l'homéostasie calcique et aucun effet de l'exposition n'a été observé. Les niveaux de ROS ont été analysés grâce à un colorant fluorescent (le H_2 -DCFDA), ce qui a permis de mesurer les niveaux cumulés après 48 h d'exposition. Avec cette méthode de mesure directe, les auteurs n'ont pas mis en évidence d'augmentation des niveaux de ROS, quelle que soit l'intensité (jusqu'à 1 000 μ T).

➤ Études *in vivo*

L'équipe de Mehmet Akdağ a réalisé une série d'expériences sur le stress oxydant, qu'elle a présentée dans 4 publications. Dans les 4 articles, des rats Sprague Dawley âgés de 4 mois ont été exposés à un champ 50 Hz pendant 10 mois (7 jours par semaine), à raison de 2 h / jour. À chaque fois, 30 animaux ont été utilisés et répartis en 3 groupes : 10 dans le groupe témoin ; 10 qui ont été exposés à 100 μ T, et 10 autres qui ont été exposés à 500 μ T. L'exposition aux ondes est assurée par un appareillage « maison ». La densité de courant a été mesurée au cours des expériences en différents points, une fois par semaine. Une fois l'exposition terminée, les animaux ont été mis à mort. Dans le premier article (Akdağ *et al.*, 2010a), les auteurs ont analysé le niveau de stress oxydant dans le cerveau. Pour cela, les hémisphères cérébraux ont été séparés et l'hémisphère droit a été utilisé pour réaliser des homogénats permettant de faire des dosages biochimiques, alors que l'hémisphère gauche a été fixé afin de réaliser des analyses en immunohistochimie (recherche de caspase-3 activée). Les dosages biochimiques ont évalué l'activité de la myéloperoxydase (MPO) et de la catalase (CAT), ainsi que la capacité antioxydante totale (TAC) et le statut oxydant total (TOS) des extraits. Les taux de peroxydation des lipides ont été évalués en dosant les niveaux de malondialdéhyde (MDA). Les auteurs rapportent que l'exposition n'a pas d'effet sur l'anatomie du système nerveux, ni sur l'apparition de cellules apoptotiques. En revanche, les auteurs observent une diminution non significative de la MPO et une diminution significative de l'activité de la CAT dans les groupes exposés (que ce soit à 100 ou à 500 μ T). Pour les autres dosages biochimiques, des différences sont uniquement observées pour le groupe exposé à la plus forte intensité (500 μ T). Dans ce groupe, une diminution du TAC et une augmentation du TOS sont observés, ainsi qu'une augmentation du niveau de MDA. Au vu de ces résultats, il semble que, suite à une exposition chronique de forte intensité, des altérations dans le profil de paramètres associés au stress oxydant dans le cerveau peuvent se produire. Dans le second article (Akdağ *et al.*, 2013a), les niveaux de stress oxydant dans le cerveau ont de nouveau été analysés, mais cette fois-ci *via* la mesure d'autres paramètres. Plus précisément, les auteurs ont évalué les niveaux d'oxydation des lipides et des protéines en quantifiant le malondialdéhyde (MDA) et la carbonylation des protéines, respectivement. En supplément, des mesures des β -amyloïdes ont été effectuées afin d'évaluer les conséquences du stress oxydant sur l'ontogenèse d'une pathologie de type Alzheimer. Les résultats présentés montrent que la carbonylation des protéines et la peroxydation des lipides (MDA) sont augmentées dans les cerveaux de rats exposés à 100 et 500 μ T sans différence significative entre 100 et 500 μ T. En revanche, les taux de bêta-amyloïdes restent inchangés.

Dans le troisième article (Akdağ *et al.*, 2013b), les chercheurs se sont intéressés aux testicules. Une fois l'exposition terminée, ceux-ci sont prélevés afin d'effectuer des détections immunohistochimiques et des dosages biochimiques (catalase, MDA, myeloperoxidase (MPO), de la capacité totale antioxydant (TAC) et oxydant (TOS)). Des analyses du sperme ont également été effectuées et elles n'ont pas révélé de différences, ni en matière de numération, ni en matière de morphologie spermatique. La détection par immunohistochimie de l'activation de la caspase 3 ne permet pas de mettre en évidence de différences significatives entre les différents lots d'animaux. Les paramètres biochimiques mesurés ne montrent pas non plus d'effets des ondes sur le stress oxydant. L'index de stress oxydatif est même diminué après exposition, mais l'écart-type des valeurs contrôles ne permet pas de rendre cette différence significative. Dans le dernier article (Akdağ *et al.*, 2014), les auteurs ont analysé l'effet de l'exposition sur les glandes salivaires (glandes sous-mandibulaires et parotides), en utilisant les mêmes dosages biochimiques que précédemment (dosages des TAC, TOS et MDA, activités des CAT, MPO). Dans les glandes sous-mandibulaires, aucune modification significative n'a été mesurée. Pour les glandes parotides, la seule modification significative observée concerne l'activité de la CAT, qui diminue sous exposition (pour les groupes exposés à 100 ou 500 μ T). De cette série de publications, il ressort que l'impact de l'exposition sur le stress oxydant dépend grandement des tissus. Les auteurs ont observé des altérations nettes dans le cerveau (surtout pour le groupe à 500 μ T), alors que l'effet est bien plus modéré, voir nul dans les glandes salivaires et les testicules, respectivement.

Saadeldin, *et al.*, (2011) ont étudié les effets sur la fonction testiculaire d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez le rat. Deux groupes de rats Wistar de 6 mois ont été exposés de manière continue à 100 μ T pendant 21 jours. Les animaux du premier groupe ont été mis à mort immédiatement après la fin de l'exposition, tandis qu'un délai de 48 heures après exposition a été attendu pour le second groupe, ceci afin d'évaluer les éventuels effets différés ou leur potentielle réversibilité. Un groupe témoin a été réalisé pour chaque condition d'exposition (mise à mort à la fin de l'exposition ou différée). Suite à l'exposition, le sang, l'épididyme et les testicules ont été prélevés afin d'effectuer une série d'analyses : numération et mesure de la motilité spermatique, dosage de la testostérone sérique, dosage de certaines molécules antioxydantes. Les auteurs trouvent un effet marqué de l'exposition sur la masse et la structure des testicules, associé à une augmentation du nombre de cellules apoptotiques dans cet organe. Une diminution de la motilité spermatique est également retrouvée. De plus, les paramètres biologiques mesurés en matière de stress oxydant montrent la présence d'un stress oxydant chez les animaux du premier groupe. Ainsi, les activités de la SOD, de la catalase et la concentration de vitamine E sont diminuées immédiatement après l'exposition. Ce stress oxydant semble transitoire, car les niveaux reviennent à la normale pour le groupe des animaux ayant bénéficié de 2 jours de récupération après l'exposition.

Sert et Deniz (2011) ont recherché d'éventuelles modifications des capacités antioxydantes du plasma avec ou sans exposition à des ondes électromagnétiques (50 Hz, 250 μ T). Ces expériences sont réalisées avec des rats Sprague Dawley âgés de 2 mois. Trois groupes de 15 animaux ont été constitués (groupe contrôle cage, exposition factice, groupe exposé) et ceux-ci ont été exposés 3 heures par jour pendant 14 jours. L'exposition est assurée par un appareillage « fait maison » constitué de deux bobines de Helmholtz de 25 cm de diamètre. L'intensité du champ magnétique mesuré dans l'appareillage est de 0,25 mT en moyenne sur 12 points différents. Les contrôles de l'appareil ont été réalisés par une personne extérieure. Les auteurs ont mesuré la capacité totale antioxydante du plasma selon deux techniques, l'une basée sur la réaction de Fenton et l'autre sur l'oxydation du Fer. Par ailleurs, la teneur en groupements thiols, et les concentrations sériques en acide ascorbique, acide urique, bilirubine, albumine et protéines totales ont été mesurées. Les auteurs ne rapportent aucune différence significative entre les 3 groupes de rats pour tous les paramètres mesurés. On peut noter que les mesures effectuées montrent une tendance à la hausse des index du stress oxydant, mais contrairement à d'autres publications, le différentiel n'est pas suffisamment fort pour être statistiquement significatif.

Le groupe de Piraye Yargicoglu a publié deux articles présentant leurs travaux effectués sur des rats Wistar. Dans les 2 études, les animaux ont été exposés à des champs électriques basses fréquences (50 Hz) d'intensité 12 ou 18 kV/m. Ces intensités sont supérieures à la limite permise

pour le grand public (5 kV/m), mais elles peuvent se rencontrer dans certaines situations professionnelles. Dans le premier article (Akpinar *et al.*, 2012), trois groupes de 10 rats ont été exposés 1 heure par jour pendant 14 jours (un groupe d'exposition factice, un groupe exposé à 12 kV/m et un dernier groupe à 18 kV/m). Les auteurs ont analysé les potentiels évoqués visuels : ces potentiels visuels sont retardés après exposition. Les auteurs ont aussi mesuré plusieurs paramètres liés au stress oxydant dans des homogénats de cerveau et de rétine. Ils ont quantifié les niveaux de malondialdéhyde comme indicateur de la peroxydation lipidique, et ils ont mis en évidence une augmentation significative dans le cerveau et la rétine pour les 2 groupes d'animaux exposés. Le statut oxydant et antioxydant total des extraits a été mesuré, ce qui a permis de définir un indice de stress oxydant. Cet indice est significativement augmenté après l'exposition aux 2 niveaux de champ électrique. Tous les effets ont été plus forts dans le groupe de 18 kV/m par rapport aux 12 kV/m. Dans le second article (Kantar Gok *et al.*, 2014), six groupes de 15 rats ont été exposés (0, 12 ou 18 kV/m) 1 heure par jour pendant 2 ou 4 semaines. Après exposition, les auteurs ont fait des tests neurologiques (enregistrement de la négativité de discordance : une onde cérébrale observée en EEG et qui est liée à un stimulus, *cf.* 7.2.2.4) et des tests biochimiques afin d'évaluer le stress oxydant et le niveau d'apoptose dans le cerveau. Les chercheurs ont particulièrement regardé l'oxydation des lipides et des protéines (dosage de la 4-hydroxy-2-nonenal (4-HNE) et de la carbonylation des protéines, respectivement). En plus des différences observées pour l'activité neurologique, les dosages biochimiques montrent une augmentation de la carbonylation des protéines après un traitement à 18 kV/m, que ce soit après 2 ou 4 semaines, ou avec un champ de 12 kV/m mais seulement après 4 semaines d'exposition. Le 4-HNE cérébral, quant à lui, est augmenté en fonction de la valeur d'exposition et de sa durée. Au final, ces 2 articles suggèrent une augmentation du stress oxydant après une exposition de plusieurs semaines à un fort champ électrique basse fréquence (2 à 3 fois la valeur limite réglementaire pour le grand public).

Dans une étude s'intéressant à l'effet de l'exposition sur la mémoire et l'apprentissage, Cui *et al.* (2012) (*cf.* 7.2.3.1) ont également mesuré plusieurs paramètres liés au stress oxydant dans le cerveau de souris. Trois groupes de 24 animaux ont été utilisés. Le premier groupe a reçu une exposition factice, tandis que les 2 autres ont été exposés à 50 Hz à une intensité de 100 μ T ou de 1 mT, 4 heures par jour pendant 12 semaines. Après la dernière exposition, les cerveaux ont été prélevés pour l'évaluation des paramètres de stress oxydatif dans l'hippocampe et le striatum : mesure de l'activité des catalases (CAT), de la glutathion peroxydase (GSH-PX), mesure de la capacité antioxydante totale des homogénats de cerveau et mesure de la concentration en malondialdéhyde (MDA). Les résultats présentés indiquent que les animaux exposés au champ le plus fort (1 mT) ont un niveau plus élevé de MDA, indiquant un taux plus fort de peroxydation lipidique. De même, dans ce groupe uniquement, les auteurs ont observé une diminution de l'activité de la CAT et de la GSH-PX, ainsi qu'une diminution de la capacité antioxydante. En revanche, le groupe exposé à 100 μ T présente les mêmes caractéristiques que le groupe témoin.

Rageh *et al.* (2012), dans une étude plutôt axée sur le stress génotoxique, ont aussi en parallèle dosé certains marqueurs du stress oxydant. Des rats nouveau-nés ont été exposés à un champ 50 Hz d'intensité 0,5 mT, de façon continue pendant 30 jours. Deux groupes de 10 animaux ont été utilisés pour cette étude (témoins ou exposés). L'impact de l'exposition sur le stress oxydant a été analysé *via* des dosages biochimiques permettant d'évaluer les niveaux de malondialdéhyde (MDA) et de glutathion (GSH), ainsi que l'activité de la superoxyde dismutase (SOD). Ces tests ont été effectués sur des homogénats de cerveaux. Les mesures montrent une augmentation du taux de MDA et de l'activité de la SOD après exposition, alors que les taux de GSH restent inchangés. En supplément, une analyse histopathologique a été réalisée sur des coupes de cerveaux. Aucune modification des tissus n'a été mise en évidence, suggérant que les stress oxydant et génotoxique observés ne conduisent pas à des événements atrophiques et dégénératifs.

L'objectif de l'étude réalisé par Selakovic *et al.* (2013) était de rechercher un état de stress oxydatif dans le cerveau de gerbilles exposées à des champs électromagnétiques basses fréquences à 50 Hz, d'intensité 100, 250 ou 500 μ T. Des animaux âgés de 3 mois (jeunes adultes) ou de 10 mois ont été exposés pendant 7 jours. Les animaux ont été mis à mort soit immédiatement après l'exposition, soit après 3 jours de récupération. Les cerveaux ont été récupérés et des homogénats

ont été réalisés afin d'analyser les niveaux de stress oxydant grâce à des tests biochimiques. Les niveaux de nitrite, de malondialdéhyde (MDA) et d'ion superoxyde ($O_2^{\cdot-}$) ont été mesurés, ainsi que l'activité de l'enzyme superoxyde dismutase (SOD). Les auteurs observent une augmentation des niveaux de MDA et d'ion superoxyde et une augmentation de l'activité de la SOD chez tous les animaux exposés. Cette augmentation est fonction de l'intensité du champ magnétique, les résultats les plus forts sont enregistrés pour les animaux exposés à 500 μ T. Ces effets semblent « réversibles » dans la mesure où, 3 jours après l'exposition, ces augmentations sont moins marquées, voire disparaissent. Ce travail a été poursuivi par Rauš Balind *et al.* (2014a). Le stress oxydant dans le cerveau de gerbilles de 3 mois a été mesuré dans le cadre d'un modèle d'étude où une ischémie est provoquée en obturant pendant 10 minutes les artères carotides. Les animaux ont été exposés à 50 Hz et 500 μ T pendant 7 jours de façon continue. Les mêmes tests biologiques que précédemment sont effectués, ce qui a permis aux auteurs de confirmer l'augmentation du stress oxydant dans le cerveau des animaux exposés.

Une équipe (Manikonda *et al.* 2014) s'est intéressée aux effets d'une exposition longue durée sur le stress oxydant dans différentes parties du cerveau de rats. Dans cette étude, 18 jeunes rats mâles de souche Wistar (21 jours au début de l'expérimentation) ont été répartis en trois groupes : un groupe contrôle et 2 groupes expérimentaux exposés à 50 ou 100 μ T (50 Hz), pendant 90 jours de façon continue (24 h / jour). L'exposition est assurée par un appareillage « fait maison », la description de cet appareil est relativement précise. L'exposition factice contrôle est réalisée dans un appareil identique mais non connecté au courant électrique. Après exposition, les animaux sont mis à mort et le cerveau de chaque animal est prélevé. L'hippocampe, le cervelet et le cortex sont isolés et plusieurs tests sont réalisés pour évaluer la production de ROS, la peroxydation lipidique, les teneurs en glutathion réduit (GSH) ou oxydé (GSSG), et les activités des enzymes superoxyde dismutase (SOD) et glutathion peroxydase (GSH-PX). L'exposition continue aux champs a provoqué un stress oxydant dans toutes les régions examinées du cerveau (cervelet > hippocampe > cortex), et ceci de façon plus importante à 100 μ T qu'à 50 μ T.

Seifirad *et al.* 2014 ont voulu explorer l'hypothèse selon laquelle l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences pouvait favoriser les dépôts lipidiques dans les artères, en favorisant la peroxydation lipidique. Pour cela, 75 rats Wistar mâles adultes ont été séparés en 5 groupes. Le premier groupe correspond aux contrôles (*sham*). Les 2^{èmes} et 3^{èmes} groupes ont été exposés de façon unique pendant 4 h à un champ magnétique 60 Hz d'intensité 0,5 mT. Les 4^{èmes} et 5^{èmes} groupes ont été exposés de façon chronique pendant 14 jours à un champ identique. Les animaux ont été mis à mort soit immédiatement (groupes 2 et 4), soit 72 h après l'exposition (groupes 3 et 5). Le sang a été collecté et les chercheurs ont mesuré les niveaux sériques de HDL, de LDL, d'acides gras libres, de MDA et de diènes conjugués. Ces 2 derniers paramètres permettent d'évaluer les niveaux d'oxydation des lipides. Les niveaux de MDA et de diènes conjugués augmentent sous exposition. Cette augmentation devient significative pour l'exposition chronique de 14 jours et elle persiste 3 jours après l'exposition. Les chercheurs ont aussi mesuré la capacité antioxydante totale du sérum (TAC) et ils ont dosé l'activité de la paraoxonase (ou apoprotéine K), une enzyme qui participe à la protection contre l'oxydation des lipides. Ces 2 derniers dosages ont révélé des résultats difficiles à interpréter car contradictoires. Dans les 2 cas, les chercheurs ont observé une augmentation après une exposition courte de 4 h, et une diminution après une exposition de longue durée. La pertinence de cette observation n'est pas discutée dans l'article et les auteurs concluent en affirmant que l'exposition est capable d'oxyder les lipides et de changer le profil lipidique du sérum.

7.1.3.3 Conclusion sur l'effet oxydatif

La grande majorité des études (17 sur 21) réalisées durant la période 2010-2015 décrivent des altérations dans l'équilibre oxydatif des cellules ou des animaux exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences. Ces études (émanant de plusieurs équipes indépendantes), ont utilisé des techniques variées et la plupart des résultats trouvés vont dans le même sens, c'est-à-dire une augmentation de la production intracellulaire de ROS et une augmentation du niveau de lipides et de protéines oxydés. Des divergences peuvent être enregistrées au niveau de l'activité des enzymes impliquées dans la lutte contre l'oxydation. Ainsi,

suivant les cas, les activités des catalases (CAT) ou des superoxydes dismutases (SOD) peuvent être soit augmentées, soit diminuées après exposition. Il est possible que ces variations soient le reflet de la cinétique complexe des boucles de rétrocontrôle impliquées dans la réponse antioxydante.

L'ensemble de ces résultats suggère ainsi une induction du stress oxydant suite à une exposition à ces ondes. Si cet effet biologique semble confirmé, il est toutefois difficile de transposer cette observation sur le plan sanitaire. Comme pour les effets génotoxiques, la presque totalité des études ont utilisé des intensités supérieures ou égales à la valeur limite d'exposition réglementaire pour le grand public (100 μ T) pendant des durées assez longues ce qui n'est pas représentatif de l'exposition rencontrée dans l'environnement résidentiel. Ceci est problématique pour l'analyse du risque, car plusieurs publications relatent une augmentation de l'intensité du stress oxydant lorsque l'intensité du champ augmente (Akdağ *et al.*, 2010 ; Cui *et al.*, 2012 ; Selakovic *et al.*, 2013 ; Manikonda *et al.*, 2014). De ce fait, l'absence d'études utilisant des niveaux observables dans l'environnement empêche toute identification d'une valeur seuil au-delà de laquelle les effets apparaissent. Cette recherche d'une valeur seuil a été effectuée en 2014 par Mattson et Simko dans une analyse bibliographique. La comparaison d'une quarantaine études *in vitro* avait permis de conclure que ce qui influençait principalement l'apparition d'un stress oxydant était le niveau du champ (au-dessus de 1 mT) et non le type cellulaire ou la durée de l'exposition. En conclusion, l'analyse des publications récentes réalisée dans le cadre de ce rapport n'apporte pas d'information supplémentaire sur la capacité d'induire un stress oxydant lors d'exposition environnementale (entre 0,01 et 0,4 μ T), mais peut être crédible pour une exposition plus élevée (supérieure à 1 mT), comme par exemple une exposition professionnelle.

Tableau 26 : synthèse des études *in vitro* concernant le stress oxydant (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)

Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
De Groot <i>et al.</i> 2014	Lignée PC12	50 Hz - 1, 10, 100 et 1000 μ T Durée : 30 min & 48 h	Production intracellulaire de ROS	Niveau constant
Patruno <i>et al.</i> , 2010	Lignée HaCaT	50 Hz – 1 mT, Durée : 3 h, 18 h ou 48 h	Synthèse et activité enzymes iNOS et eNOS Production d'oxyde nitrique (NO) cellulaire Production d'anion superoxide (O_2^-) Activité enzyme CAT	Augmentation Augmentation Diminution Diminution
Patruno <i>et al.</i> , 2011	Lignées HaCaT & THP-1	50 Hz – 1 mT, Cinétique 3 à 24 h	Activité CAT Activité NOS Activité CYP-450	Augmentation Augmentation Augmentation
Reale <i>et al.</i> , 2014	Lignée SH-SYS5	50 Hz – 1 mT, Cinétique 3 à 24 h	Activité CAT Activité NOS Activité CYP-450 Production d'anion superoxide (O_2^-)	Augmentation Augmentation Augmentation Augmentation
Patruno <i>et al.</i> , 2015.	Lignée K562	50 Hz – 1 mT, Cinétique 3 à 24h	Activité iNOS Activité CAT Activité CYP-450	Diminution Augmentation Augmentation
Hong <i>et al.</i> , 2012	Lignée MCF10A	60 Hz – 1 mT, Durée : 4 h	Production intracellulaire de ROS Dosage du ratio GSH/GSSH Activité SOD	Niveau constant Niveau constant Niveau constant
Park <i>et al.</i> , 2013	Lignée hBM-MSK	50 ou 100 Hz - 1 mT Durée : 6 jours	Production intracellulaire de ROS	Augmentation

Tableau 27 : récapitulatif sur les études *in vivo* concernant le stress oxydant (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)

Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
Manikonda <i>et al.</i> , 2014	Rats adultes Organe : cerveau	50 Hz – 50 & 100 μ T, Durée : 90 jours (en continu)	Production intracellulaire de ROS Dosage du ratio GSH/GSSH Dosage MDA Activité SOD Activité GSH-PX	Augmentation Diminution Augmentation Augmentation (à 100 μ T) Augmentation
Selakovic <i>et al.</i> , 2013	Gerbils adultes Organe : cerveau	50 Hz – 100, 250 & 500 μ T, Durée : 7 jours (en continu)	Dosage MDA Production d'oxyde nitrique (NO) Production d'anion superoxide (O_2^-) Activité SOD	Augmentation Augmentation Augmentation Augmentation
Saadeldin, <i>et al.</i> , 2011	Rats adultes Organe : testicules	50 Hz – 100 μ T, Durée : 21 jours (en continu)	Activité CAT Activité SOD Dosage vitamine E	Diminution Diminution Diminution
Cui <i>et al.</i> 2012	Souris adultes Organe : cerveau	50 Hz – 100 μ T & 1 mT Durée : 12 semaines (4 h / j)	Activité CAT Activité GSH-PX Dosage MDA Dosage capacité antioxydante totale (TAC)	Diminution (à 1 mT seulement) Diminution (à 1 mT seulement) Augmentation (à 1 mT seulement) Diminution (à 1 mT seulement)
Akdağ <i>et al.</i> , 2010b	Rats adultes Organe : cerveau	50 Hz – 100 & 500 μ T, Durée : 10 mois (2 h/j)	Activité CAT Activité MPO Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Dosage statut oxydant total (TOS) Dosage MDA	Diminution Niveau constant Diminution (à 500 μ T) Augmentation (à 500 μ T) Augmentation (à 500 μ T)

Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
Akdağ <i>et al.</i> , 2013a	Rats adultes Organe : cerveau	50 Hz – 100 & 500 μ T, Durée : 10 mois (2 h / j)	Dosage MDA Dosage carbonylation des protéines	Augmentation Augmentation
Akdağ <i>et al.</i> , 2013b	Rats adultes Organe : testicules	50 Hz – 100 & 500 μ T, Durée : 10 mois (2 h / j)	Activité CAT Activité MPO Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Dosage statut oxydant total (TOS) Dosage MDA	Niveau constant Niveau constant Niveau constant Niveau constant Niveau constant
Akdağ <i>et al.</i> , 2014	Rats adultes Organe : glandes salivaires	50 Hz – 100 & 500 μ T, Durée : 10 mois (2 h / j)	Activité CAT Activité MPO Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Dosage statut oxydant total (TOS) Dosage MDA	Niveau constant dans les glandes sous-mandibulaires & diminution pour les glandes parotides Niveau constant Niveau constant Niveau constant Niveau constant
Sert <i>et al.</i> , 2011	Rats adultes Organe : plasma sanguin	50 Hz – 250 μ T, Durée : 14 jours (3 h / j)	Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Dosage vitamine C	Niveau constant Niveau constant
Seifirad <i>et al.</i> , 2014	Rats adultes Organe : plasma sanguin	50 Hz – 500 μ T, Durée : 4 h & 14 jours	Dosage MDA Dosage diènes conjugués Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Activité PON1	Augmentation (pour 14 j d'expo) Augmentation (pour 14 j d'expo) Augmentation après 4 h d'expo & diminution après 14 j d'expo Augmentation après 4 h d'expo & diminution après 14 j d'expo

Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
Rauš Balind <i>et al.</i> 2014a	Gerbilles adultes Organe : cerveau en état d'ischémie	50 Hz – 500 μ T, Durée : 7 jours (en continu)	Dosage MDA Production d'oxyde nitrique (NO) Production d'anion superoxyde (O_2^-) Activité SOD	Augmentation Augmentation Augmentation Augmentation
Rageh, <i>et al.</i> , 2012	Rats nouveau-nés Organe : cerveau	50 Hz – 500 μ T, Durée : 30 jours (en continu)	Dosage MDA Dosage GSH Activité SOD	Augmentation Niveau constant Augmentation
Akpinar <i>et al.</i> , 2012	Rats adultes Organe : cerveau et rétine	50 Hz - 12 & 18 kV/m Durée : 14 jours (1 h / j)	Dosage MDA Dosage capacité antioxydante totale (TAC) Dosage statut oxydant total (TOS)	Augmentation Diminution Augmentation
Kantar Gok <i>et al.</i> , 2014	Rats adultes Organe : cerveau	50 Hz - 12 & 18 kV/m Durée : 2 ou 4 semaines (1 h / j)	Dosage 4-HNE Dosage carbonylation des protéines	Augmentation Augmentation

7.1.4 Effets sur la physiologie cellulaire

Lors du processus de cancérisation, plusieurs modifications physiologiques peuvent être enregistrées au niveau des cellules. Ces modifications sont connues sous le nom de transformation cellulaire, et elles conduisent vers une perte de l'identité cellulaire (phénomène de dédifférenciation) et vers une prolifération anarchique. En plus de la perte du contrôle de la prolifération cellulaire, les cellules, lors de leur transformation, vont gagner une désensibilisation au phénomène d'apoptose (mort cellulaire programmée). Elles peuvent aussi acquérir la possibilité de se détacher et de migrer, pour former des métastases. Ces phénomènes s'accompagnent d'une modification de l'expression génétique et d'une modification de l'activation de certaines voies de signalisation.

Plusieurs équipes ont étudié l'impact des ondes électromagnétiques basses fréquences sur la physiologie cellulaire. Les effets sur le cycle cellulaire, l'apoptose et la différenciation ont surtout été étudiés. Ces travaux sont donc de première importance pour estimer l'impact potentiel de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de cancer. Toutefois, l'analyse de ces publications montre clairement que la majorité de ces travaux utilisent des expositions particulières, sans rapport avec les fréquences et les niveaux rencontrés dans l'environnement. En effet, ces recherches ont surtout été faites dans l'optique de mieux comprendre les effets thérapeutiques de ces ondes. Les ondes basses fréquences peuvent être utilisées pour favoriser la cicatrisation, ou pour induire la différenciation de certaines cellules souches, ce qui intéresse le milieu médical dans une perspective d'ingénierie des tissus. Ces applications médicales peuvent utiliser des champs à des fréquences particulières (de 3 à 30 Hz, ou de 30 à 300 kHz), de forte intensité (de l'ordre du mT ou plus), ou encore des ondes « pulsées ». L'aspect thérapeutique étant hors du cadre de cette saisine, les articles présentant des systèmes d'exposition caractéristiques de ces applications (comme par exemple des ondes impulsionnelles), ou un niveau d'exposition supérieur ou égal à 1 mT, ont été exclus de la présente analyse.

7.1.4.1 Études in vitro

Sun *et al.*, 2010 ont étudié l'expression de gènes impliqués dans l'apoptose, après exposition à un champ magnétique basse fréquence à 50 Hz, d'une intensité de 200 ou 400 μ T. Leur but étant d'estimer l'impact de l'exposition sur la reproduction, ils ont utilisé comme modèle des cellules humaines du trophoblaste qu'ils ont cultivées et exposées pendant 48 ou 72 h. Les niveaux des messagers codant des facteurs impliqués dans l'apoptose (BCL-2, BAX, caspase-3, p53 et FAS) ont été quantifiés par RT-PCR et aucun changement n'a pu être mis en évidence après exposition. En revanche, les dosages hormonaux effectués lors de cette étude montrent une diminution de la sécrétion de progestérone et de β -hCG de la part des cellules en culture. Cet effet n'a pu être observé que pour l'exposition la plus longue et la plus forte (72 h à 0,4 mT). Les auteurs concluent que l'exposition peut affecter les fonctions normales des cellules, mais ne peut pas induire de dommages cellulaires suffisants pour déclencher l'apoptose. La même équipe, 2 ans plus tard, a regardé l'influence des champs sur le flux du calcium (Sun *et al.*, 2012). Les flux calciques jouent un rôle primordial dans la voie intrinsèque de l'apoptose. De ce fait, vérifier s'ils peuvent être perturbés par un champ magnétique basse fréquence est de première importance. L'objectif de cette étude était de vérifier le modèle proposé par Lednev (Belova *et al.*, 2007). Selon cette hypothèse, la polarisation des noyaux d'hydrogène aux fréquences non résonnantes peut provoquer des effets biologiques dans les protéines des canaux calciques. Des membranes plasmiques ont été purifiées pour pouvoir réaliser des vésicules artificielles riches en canaux et pompes à calcium. Ces vésicules ont été exposées, soit à un champ statique de 26 μ T, soit à un champ magnétique à 60 Hz, d'intensité 0,6 ou 6,3 μ T. L'utilisation de calcium radioactif comme marqueur a permis d'évaluer les flux calciques. Aucun changement n'a été enregistré lors des expériences, ce qui ne valide pas l'hypothèse de Lednev.

Une équipe (Song *et al.*, 2010) a recherché l'impact d'une exposition à un champ 60 Hz, à 100 μ T et 1 mT, sur certaines voies de signalisation liées aux membranes plasmiques. Deux lignées cellulaires ont été exposées pendant 4 ou 16 h (cellules RAW 264.7 : macrophages murins, et

cellules RBL-2H3 : cellules leucémiques de rat). Les chercheurs ont quantifié l'activité des phospholipases PLA2, PLC et PLD, car ces enzymes jouent le rôle de transducteurs de signaux dans de nombreux processus cellulaires. En utilisant des substrats spécifiques radiomarqués, ils n'ont pas pu observer de changement dans l'activité de ces enzymes, que ce soit au niveau de l'activité basale, ou au niveau d'une activité induite par un signal cellulaire (induction par la méliittine). Les auteurs concluent que l'exposition aux champs n'interfère pas avec les voies de signalisation associées aux phospholipases. Ce travail a été poursuivi au sein de l'équipe de Hwang *et al.*, en 2011, en utilisant un protocole d'exposition similaire. L'effet des champs basses fréquences sur la concentration intracellulaire en calcium et sur l'exocytose dans les cellules RBL-2H3 a été étudié, ces deux phénomènes étant essentiels dans les processus de signalisation et de communication cellulaire. Les chercheurs n'ont pas pu mettre en évidence d'effet significatif sur la viabilité cellulaire, ni sur la mobilisation intracellulaire en Ca^{2+} . Les mesures faites sur les niveaux de β -hexosaminidase libérées ne montrent pas non plus d'effet des ondes sur l'exocytose.

Une équipe a publié une série de cinq études portant sur la réponse proliférative des cellules sous exposition. En premier lieu, Cid *et al.*, (2012) ont soumis des cellules hépatiques de la lignée HepG2 à une exposition intermittente (3 h *on* / 3 h *off*) à un champ magnétique à 50 Hz d'intensité 10 μT , pendant 24, 42 ou 90 h. L'expérience a été réalisée en présence, ou non, de doses croissantes de mélatonine, hormone connue pour exercer un effet cytotatique sur certains modèles *in vitro*, notamment sur les cellules HepG2. La prolifération cellulaire a été suivie en traquant la réplication de l'ADN *via* l'incorporation de 5-BrdU et la détection de PCNA (une protéine faisant partie du complexe enzymatique assurant la réplication). La différenciation des cellules a également été examinée en quantifiant l'expression de l'albumine et de l'alpha-fœtoprotéine. Les auteurs ont pu constater que l'exposition au champ favorise la prolifération cellulaire et la différenciation des cellules. Ces effets peuvent être bloqués par la mélatonine, qui exerce des effets contraires (favorise la différenciation et inhibe la prolifération). Trillo *et al.* (2012) ont complété cette étude en comparant la réponse entre 2 lignées cellulaires humaines. Des cellules NB69 (neuroblastomes) et HepG2 (hépatocarcinomes) ont été exposées de façon intermittente (3 h *on* / 3 h *off*) pendant 42 heures, à un champ magnétique à 50 Hz et 100 μT . Les chercheurs ont également co-traité les cellules avec du rétinol, car cette molécule possède des propriétés protectrices contre certains types de stress cellulaires (oxydant par exemple). La prolifération cellulaire a été déterminée par comptage des cellules, *via* l'incorporation de 5-BrdU, et en dosant la teneur totale en protéines et en ADN. S'ils ont été administrés séparément, les deux traitements (exposition au champ ou rétinol) augmentent la prolifération cellulaire dans les deux lignées cellulaires. En revanche, en cas de co-traitement, on observe un effet additif sur la prolifération cellulaire des NB69, alors que pour les HepG2, la prolifération cellulaire induite par le rétinol est partiellement bloquée par une exposition simultanée au champ magnétique. Ce résultat suggère que les mécanismes sous-jacents de la réponse cellulaire au champ basse fréquence doivent être spécifiques au type cellulaire. L'article suivant approfondit l'étude en recherchant les voies de signalisation potentiellement activées par l'exposition (Martinez *et al.*, 2012). Tout d'abord, les chercheurs ont pu déterminer que seules les expositions (50 Hz, 100 μT) par intermittence (3 h *on* / 3 h *off*, ou 5 min *on* / 10 min *off*) ont un impact sur la prolifération des cellules NB69, contrairement à une exposition continue qui est sans effet significatif. De plus, ils ont pu montrer que l'effet prolifératif pouvait être bloqué par l'emploi d'inhibiteurs spécifiques des kinases ERK1/2. L'état d'activation d'ERK1/2 (*via* sa phosphorylation) a été examiné par *western-blot* et immunocytochimie. Il en ressort que l'activation de ces kinases intervient très vite au début de l'exposition et qu'elle est transitoire. Les auteurs pensent que les cellules ont sans doute développé des mécanismes adaptatifs contre les effets des champs basses fréquences. Cela montre l'intérêt de l'exposition par intermittence, car l'activation transitoire de ERK1/2 est alors prolongée de façon séquentielle lors des expositions répétées et discontinues. Les chercheurs de cette équipe ont ensuite voulu vérifier si l'effet prolifératif obtenu en exposant les cellules NB69 à 100 μT pouvait également être observé avec des intensités plus faibles. Trillo *et al.* (2013) ont exposé la même lignée cellulaire à un champ intermittent (3 h *on* / 3 h *off*) de 10 μT , pendant 42 h. En utilisant la même méthodologie que celle décrite dans Cid *et al.* (2012), ils ont pu confirmer leurs premières observations faites à 100 μT et montrer que le même effet prolifératif pouvait être

obtenu avec un champ de 10 μ T. Enfin, Martinez *et al.* (2015) ont étudié les effets d'un champ électromagnétique basses fréquence sur l'adipogenèse de cellules souches isolées à partir du tissu adipeux humain (ADSC). L'exposition a été effectuée comme précédemment (50 Hz, 100 μ T, 3 h *on* / 3 h *off*, pendant 42 h). L'accumulation de lipides dans les cellules a été analysée par microscopie après une coloration spécifique. Les résultats montrent une baisse significative du contenu intracellulaire en lipides, suggérant un effet anti-adipogène des ondes. Parallèlement, les niveaux protéiques en certains facteurs effecteurs de l'adipogenèse précoce (PPAR γ , p-ERK1/2 et SOX9) ont été quantifiés. Ces niveaux sont modifiés sous exposition, ce qui sous-entend que la voie de signalisation ERK / PPAR γ pourrait être impliquée dans cet effet.

Bouwens *et al.* (2012) ont voulu estimer l'effet d'une exposition sur les cellules du système immunitaire. Pour cela, une lignée cellulaire issue de leucémie monocyttaire humaine (THP-1), des macrophages, et des monocytes primaires ont été exposés à deux types de signaux différents : soit un champ à 50 Hz, soit un champ complexe composé de 4 fréquences (320, 730, 880 et 2 600 Hz) d'amplitudes égales. La valeur du champ magnétique est de 5 μ T dans les 2 cas. L'expression de 8 cytokines ou autres facteurs liés à l'inflammation (IL-1 β , IL-6, IL-8, TNF- α , IL-12p40, IL-10, NF- κ B, et COX-2) a été analysée en cinétique (de 0,5 à 24 h après une stimulation au LPS). Quel que soit le type de signal, ou le type cellulaire, l'exposition n'a pas eu d'effet significatif sur l'expression des ARNm et des protéines. Avec le même système d'exposition, Golbach *et al.* (2015) ont regardé l'impact de l'exposition aux champs basses fréquences sur la signalisation calcique de cellules en culture. Des lignées promyélocytaires (HL60 et PLB-985) ont été différenciées en neutrophiles, puis exposées à un champ 50 Hz, ou à une combinaison de 4 fréquences, à 5, 300 ou 500 μ T. La concentration en calcium intracellulaire a été mesurée grâce à l'emploi d'un colorant fluorescent. Quelle que soit la fréquence (50 Hz ou combinaison complexe de 4 fréquences), l'intensité (de 5 à 500 μ T) ou la durée (de 30 min à 5 jours), l'exposition n'a pas modifié les flux calciques intracellulaires. Les auteurs ont également analysé l'expression de plusieurs gènes choisis pour leur implication dans la différenciation des neutrophiles (*CD11b*, *TRPC6*, *IP3RT1*, *STIM1*, *Calmodulin*, *Arp2/3*, *Orai1*). L'exposition est sans impact sur l'expression de ces gènes.

He *et al.* (2013) ont étudié les effets d'une exposition au champ magnétique basse fréquence sur l'activité des canaux sodiques activés par dépolarisation (Na $_v$ pour *voltage-activated Na-channels*). Pour cela, des cellules ont été isolées à partir de cervelet de rats de 7 jours et ont été exposées à un champ 50 Hz d'intensité 400 μ T ou 1 mT pendant un temps variable (de 10 min à 12 heures). L'activité électrique des cellules a été enregistrée par la technique du « *patch-clamp* ». Les chercheurs ont observé une augmentation de l'activation des Na $_v$ sous exposition. Les profils enregistrés étaient significativement décalés vers un état d'hyperpolarisation. Cette augmentation dépend de l'intensité du champ magnétique (les effets à 1 mT sont plus marqués qu'à 0,4 mT) et de la durée de l'exposition (avec un pic à 1 h, et un déclin de la réponse ensuite si l'exposition est prolongée). L'utilisation d'inhibiteurs ou d'antagonistes pharmacologiques a permis d'identifier un mécanisme possible pour expliquer cette activation. Dans le modèle proposé, les champs activeraient la phospholipase calcium-dépendante A2 (cPLA2), ce qui augmenterait les niveaux intracellulaires en acide arachidonique et en prostaglandine E2. Cette dernière molécule pourrait agir de manière autocrine ou paracrine pour activer son propre récepteur membranaire. Il en résulterait une activation de la voie de signalisation cAMP/PKA et, par conséquent, une activation des canaux Na $_v$. Ce travail sur les canaux Na $_v$ a été poursuivi par Liu *et al.* (2014). Avec la même méthodologie, les chercheurs ont confirmé leurs résultats précédents et ils ont pu affiner leur modèle en montrant que la mélatonine pouvait bloquer l'activation des Na $_v$ induite par les ondes. Cette inhibition passerait par une seconde voie de signalisation, impliquant le calcium et la calmoduline. La même équipe a également regardé l'effet des champs basses fréquences sur d'autres canaux membranaires : les canaux calciques activés par de faibles dépolarisations membranaires (*low-voltage gated (LVA) T-type calcium channels*). Cui *et al.* (2014) ont utilisé des cellules HEK293 (lignée issue d'un rein embryonnaire humain) qu'ils ont transfectées de façon à exprimer les canaux de type T, puis les cellules ont été exposées à 50 Hz et 200 μ T, pendant 1 à 3 heures. Les chercheurs se sont servi d'un appareil de *patch clamp* ultra performant pour l'enregistrement de faibles signaux (Axopatch), et il ressort de ces expériences que l'exposition

inhibe l'activité de tous les canaux de type T (Cav3.1, Cav3.2 et Cav3.3). Des dosages ELISA ont également permis de montrer que l'exposition augmente les niveaux intracellulaires en acide arachidonique (AA) et en leucotriène E4 (LTE4). L'utilisation d'inhibiteurs comme le CAY10502 et la bestatine, qui bloquent respectivement l'augmentation de AA et du LTE4, ont aboli l'effet inhibiteur des ondes sur les canaux Cav3.2. Les auteurs concluent que les champs basses fréquences inhibent l'activité des canaux calciques de type T *via* une voie de signalisation qui reste à définir, mais qui implique l'acide arachidonique et le leucotriène E4.

Jia *et al.*, (2014) ont étudié les effets biologiques d'un champ électromagnétique basse fréquence (50 Hz, 400 μ T), associé à des nanoparticules magnétiques modifiées et contenant du dioxyde de silicium (MNP-SiO₂). Des cellules PC12 ont été utilisées et la cytotoxicité, ainsi que l'apoptose, ont respectivement été évaluées grâce à un test MTT et une analyse par cytométrie de flux. Les résultats montrent que la présence de MNP-SiO₂ réduit la viabilité cellulaire d'une manière dépendant de la dose, alors que l'exposition à 50 Hz seule n'a aucun effet. La viabilité cellulaire est plus faible en cas de co-exposition champs / MNP-SiO₂ et la proportion de cellules apoptotiques augmente significativement. En conclusion, les auteurs pensent que la nature magnétique des nanoparticules pourrait expliquer la forte toxicité de la combinaison de ces 2 facteurs. Selon cette hypothèse, les nanoparticules exacerberaient l'effet biologique des ondes en amplifiant la force du champ magnétique dans les cellules. Une seconde équipe a étudié les effets combinés des champs et des nanoparticules magnétiques, et ils ont trouvé des résultats assez proches. Wen *et al.*, (2014) ont synthétisé des particules de magnétite (Fe₃O₄) de 20 nm de diamètre en moyenne. Ces nanoparticules ont été mises en contact avec des cellules hépatiques (lignées BEL-7402 et HL7702) pendant 24 h, ce qui a permis aux cellules de les internaliser. Les cellules ont ensuite été exposées à un champ à 100 Hz d'intensité 700 μ T selon des cycles de 30 min *on* / 60 min *off*, répétés 5 fois. La viabilité cellulaire a été mesurée *via* un dosage de l'activité déshydrogénase cellulaire et l'apoptose a été classiquement évaluée par cytométrie de flux. De façon plus ou moins marquée suivant le type cellulaire, les nanoparticules magnétiques combinées au champ magnétique de 100 Hz inhibent de manière significative la prolifération cellulaire et induisent une apoptose plus élevée (jusqu'à 13 % dans les BEL-7402). L'effet observé est bien supérieur au traitement avec particules ou ondes seules. Il faut noter que dans leurs conditions d'exposition, les chercheurs ont observé un très léger effet des champs seuls (inhibition d'environ 2 % de la viabilité pour les cellules BEL-7402). Les auteurs ont pu constater que les niveaux de mort cellulaire sont corrélés à la quantité de nanoparticules absorbées par les cellules et que l'effet combiné pourrait, d'après leur mesure, s'expliquer par le fait que l'exposition aux ondes entraîne une absorption de particules ferreuses plus élevée.

Zhu *et al.* (2014) ont réalisé une étude dans le but de mieux appréhender les effets potentiels des ondes électromagnétiques basses fréquences sur l'œil. Pour cela, des fibroblastes primaires, isolés à partir de la sclérotique⁶⁰ de fœtus humains, ont été exposés à un champ magnétique basse fréquence à 50 Hz d'intensité 200 μ T, pendant 24 h. La viabilité cellulaire a été mesurée en dosant l'activité lactate déshydrogénase, ce qui a permis de mettre en évidence un effet cytostatique de l'exposition. De façon à aller plus loin dans le mécanisme, les chercheurs ont regardé l'expression de certains gènes choisis pour leur rôle dans la formation de la matrice extracellulaire. Un effet-dose (de 0,1 à 1 mT) et une cinétique (de 6 à 48 h) ont été réalisés. Les taux des ARN messagers *COL1A1* (collagène de type I), *TIMP2* (*tissue inhibitor of matrix metalloproteinase-2*) et *FGF-2* (*fibroblast growth factor-2*) diminuent sous exposition, alors que les niveaux de *MMP-2* (*matrix metalloproteinase-2*) et de *TGF- β 2* (*transforming growth factor beta-2*) augmentent. En général, les effets sont plus marqués pour les intensités les plus fortes et les durées d'exposition les plus longues. Les auteurs concluent que, pendant le processus de développement embryonnaire, l'exposition peut provoquer une vulnérabilité dans l'œil. La

⁶⁰ La sclérotique est une membrane dure, fibreuse et blanche qui enveloppe la partie extérieure du globe oculaire.

perturbation de la formation de la matrice extracellulaire peut provoquer une déformation du globe oculaire qui peut gêner la vision (problème de focalisation).

Destefanis *et al.* (2015) ont étudié l'influence des champs électromagnétiques basses fréquences sur le métabolisme mitochondrial et sur la croissance de plusieurs types de cellules cancéreuses. Des lignées issues de cancers humains (cancer du sein (SKBR3), cancer gastrique (GTL16), cancer du côlon (HT29), et mélanome (A375P)) ont été exposées à un champ 50 Hz d'intensité 12 μ T pendant 3 ou 7 jours. Le métabolisme mitochondrial a été analysé *via* la mesure de leur potentiel de membrane et de l'activité de la lactate déshydrogénase. Les niveaux d'ATP mitochondrial ont également été dosés. Des analyses en cytométrie de flux n'ont pas permis de mettre en évidence des phénomènes d'apoptose, en revanche une quantification des cellules, après coloration au cristal violet, montre que toutes les lignées ralentissent leur prolifération après 7 jours d'exposition. Les auteurs montrent également qu'une exposition de 3 ou 7 jours entraîne une augmentation du potentiel membranaire des mitochondries. Cette observation suggère un changement dans l'activité de la chaîne respiratoire de cet organelle, pourtant les mesures d'ATP n'ont pas montré de différence significative. Les niveaux en ARNm codant des facteurs de la chaîne respiratoire (COX II et COX IV) ont été quantifiés par RT-PCR et aucune modification de leur expression n'a pu être mise en évidence. Les chercheurs ont ensuite évalué si le champ pouvait moduler les concentrations cellulaires de certaines protéines mitochondriales. Un fractionnement cellulaire a été effectué et les niveaux protéiques dans les mitochondries, ou dans les noyaux, ont été quantifiés par *western-blot*. Il a été montré une diminution de la présence des protéines phospho-ERK, p53 et cytochrome c, dans les mitochondries, alors que les niveaux nucléaires ou totaux sont invariants. Les auteurs concluent que les champs basses fréquences peuvent ralentir la croissance des cellules cancéreuses, en augmentant l'activité respiratoire des cellules et en modifiant l'expression de certaines protéines mitochondriales.

Manzella *et al.* (2015) ont étudié les effets des champs magnétiques basses fréquences sur l'expression des gènes régulant l'horloge circadienne. Pour cela, des fibroblastes de peau humaine ont été cultivés et exposés à un champ d'intensité 100 μ T (50 Hz) pendant 1 h, puis la culture a été poursuivie de façon à faire une cinétique et visualiser les cycles d'expression caractéristiques de ces gènes. Les cycles peuvent être mis en évidence grâce à une stimulation au sérum qui permet de synchroniser toutes les cellules en culture. Les ARNm ont été purifiés à des temps variables (1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 8 h, 12 h, 16 h, 24 h, 28 h, 32 h, 36 h, 40 h et 48 h après exposition) et les niveaux des ARN messagers *BMAL1*, *PER2*, *PER3*, *CRY1*, et *CRY2* quantifiés par RT-PCR. Après exposition, les chercheurs observent une perturbation de l'expression cyclique de tous ces gènes, ce qui suggère que les champs basses fréquences pourraient être capables d'interférer avec les processus physiologiques circadiens. Cependant, ces perturbations dépendent fortement du protocole employé. L'effet est significatif quand l'exposition et le début de la stimulation au sérum sont effectués en même temps, mais nul si l'exposition est effectuée 2 h après la stimulation.

Une équipe a réalisé une étude afin de vérifier l'impact de l'exposition sur les jonctions communicantes des cellules (Percherancier *et al.*, 2015). Ces jonctions sont essentielles à la communication entre cellules adjacentes et jouent un rôle primordial dans la régulation de la différenciation et de la prolifération cellulaire. Une lignée de cellules fibroblastes (NIH3T3) a été exposée à un champ 50 Hz (400 μ T et 1 mT) pendant 24 h. Les cellules ont été colorées à la calcéïne et des expériences de photoblanchissement (FRAP - *Fluorescence recovery after photobleaching*) ont été réalisées de façon à vérifier si le colorant était capable de passer d'une cellule à l'autre *via* les jonctions communicantes. Les auteurs n'ont observé aucune modification de la communication intercellulaire, que ce soit de façon directe ou après un traitement au PMA (phorbol-12-myristate-13-acetate), un inhibiteur connu de ces jonctions interstitielles.

7.1.1.1 Études in vivo

Borhani *et al.* (2011) ont regardé l'impact de l'exposition sur la fragmentation apoptose-dépendante de l'ADN. De jeunes souris femelles ont été exposées (ou non) pendant 2 semaines (champ 50 Hz à 0,5 mT, 4 h par jour et 6 jours par semaine). Au milieu de la période d'exposition, l'ovulation a été déclenchée par injection de gonadotropine, puis les femelles ont été fécondées.

Quatre jours après les traitements hormonaux, les femelles gestantes ont été mises à mort, leur utérus disséqué et les embryons précoces récupérés. La fragmentation de l'ADN dans les blastocytes a été vérifiée par un essai TUNEL, une technique qui permet de révéler les fragmentations d'ADN résultant de mort cellulaire programmée. Les auteurs ont trouvé que l'exposition augmente légèrement mais significativement la fragmentation de l'ADN. Les auteurs concluent que l'exposition aux champs basses fréquences a des effets négatifs sur la fertilité et le développement, en diminuant le nombre de blastocystes par femelle gestante et en augmentant la fragmentation apoptose-dépendante de l'ADN dans les cellules des embryons précoces.

Deux équipes indépendantes ont utilisé des approches génomiques haut-débit pour analyser l'impact global de l'exposition sur l'expression génétique. Dans une première étude, Fedrowitz et Löscher (2012) ont exposé deux souches de rates jeunes (44 – 47 jours au départ de l'expérimentation), Fischer 344 et Lewis, à un champ magnétique de 100 μ T pendant 2 semaines, de manière continue (5 animaux par groupe). L'exposition factice est réalisée dans les mêmes conditions que l'exposition réelle et les paramètres d'exposition sont mesurés régulièrement. Après exposition, les animaux sont anesthésiés et mis à mort et la glande mammaire prélevée dans des conditions destinées à préserver les ARNm. Une analyse en *microarray* a été réalisée sur les ARNm purifiés afin de visualiser quels seraient les gènes candidats impliqués dans les effets cancérigènes des champs électromagnétiques basses fréquences. Les résultats obtenus montrent une très modeste modification de l'expression génétique : 9 gènes chez les rats Lewis et 14 gènes chez les F344 ont présenté un différentiel d'expression entre les animaux contrôles et les animaux exposés. On peut regretter qu'aucune vérification par RT-PCR n'ait été effectuée pour confirmer les résultats obtenus par cette méthode haut-débit. Les auteurs mettent en avant la forte baisse de l'expression des gènes α -amylase, anhydrase carbonique 6 et lactoperoxidase car ces modifications sont spécifiques des rats Fischer 344 et que des travaux antérieurs avaient souligné une sensibilité particulière de cette souche aux champs magnétiques. La pertinence biologique de ces observations est peu discutée car le lien entre ces gènes et le phénomène de cancérisation est loin d'être évident. Au contraire, on pourrait conclure qu'à part 2 ou 3 exceptions, une exposition prolongée à 100 μ T, ne modifie pas l'expression génétique dans les tissus mammaires. Dans une seconde étude, Kabacik *et al.* (2013) ont exposé des souris C57BL/6 juvéniles âgées de trois semaines environ à un champ 50 Hz d'intensité 100 μ T pendant 2 heures. Une première série d'animaux a été exposée dans le but de servir d'étude pilote (2 groupes de 3 animaux). Les cellules de la moelle osseuse ont été prélevées et une analyse transcriptomique haut-débit a été effectuée par *microarray*. Ceci a permis d'identifier quatre transcrits différentiellement exprimés sous exposition : 2 issus de gènes dont le rôle est inconnu (*AK152075* et *F10-NED*), et 2 issus de gènes connus (*Picalm* et *Xpo7*). Le gène *Picalm* étant fréquemment réarrangé dans les leucémies humaines, les auteurs ont réalisé une vérification par RT-PCR. L'expression différentielle de *Picalm* n'a pas été retrouvée lors de cette expérience de confirmation, ce qui laisse supposer que ce gène était un faux positif. Une seconde série d'exposition a été réalisée sur une cinquantaine d'animaux. Les ARN messagers de 19 animaux exposés et de 15 animaux contrôles ont pu être utilisés pour analyser l'expression génétique par *microarray* et par RT-PCR. Aucune expression différentielle significative n'a pu être mise en évidence lors de cette seconde série d'expériences. Au final, cette étude ne fournit aucun élément de preuve suggérant qu'une exposition aiguë à 100 μ T puisse affecter l'expression génétique.

Lors d'une réponse immunitaire, les lymphocytes T naïfs peuvent se différencier en lymphocytes T auxiliaires (LT_H1, LT_H2, ou LT_H17) selon l'environnement de cytokines. De plus, les LT_H1 agissent spécifiquement contre les tumeurs. L'étude de Salehi *et al.*, en 2013, a recherché si l'exposition aux champs basses fréquences peut interférer sur la production de cytokines et déséquilibrer la balance LT_H1/LT_H2/LT_H17 (Salehi *et al.*, 2013). Quarante rats Wistar mâles ont été répartis en 2 groupes (un groupe exposé et un groupe d'exposition factice). Les animaux ont été exposés à un champ à 50 Hz d'intensité 100 μ T, 2 heures par jour pendant 3 mois, à des heures précises. L'exposition est réalisée dans un appareil développé par les auteurs. Les animaux sont mis à mort et le sang, la rate et le thymus sont prélevés. Les concentrations d'IFN- γ et d'interleukines 4, 6 et 12 ont été estimées dans la rate et dans le sang total par technique ELISA. L'exposition aux ondes n'a eu d'effet ni sur la masse corporelle des animaux, ni sur celle du thymus ou de la rate. Les

résultats n'ont montré aucune modification dans les taux sériques d'IFN- γ , d'IL4 et d'IL12. Cependant, la production *in vitro* d'IL-6 par la rate ou dans le sang total après activation par phytohemagglutinine A a été augmentée, tandis qu'elle est restée inchangée pour l'IFN- γ , l'IL4 et l'IL12. Les résultats de cette étude sont à interpréter avec prudence compte tenu du manque de détail dans la description des tests biologiques.

7.1.1.2 Conclusions sur les effets sur la physiologie cellulaire

Durant la période 2010-2015, de nombreuses études ont regardé l'effet de l'impact de l'exposition sur le fonctionnement cellulaire (90 recensées). Toutefois, la majorité de ces études a été réalisée dans le cadre de l'utilisation thérapeutique des ondes basses fréquences, ce qui implique des conditions d'exposition particulières (forte intensité et/ou impulsions), sans rapport avec les niveaux d'exposition rencontrés dans l'environnement par le grand public. Sur les 23 publications analysées, car utilisant des champs magnétiques inférieurs à 1 mT, seules 6 d'entre elles ont employé des niveaux inférieurs à 100 μ T : Bouwens *et al.*, 2012 (5 μ T), Cid *et al.*, 2012 (10 μ T), Destefanis *et al.*, 2015 (12 μ T), Golbach *et al.*, 2015 (5 μ T), Sun *et al.*, 2012 (0,6 et 6,3 μ T), Trillo *et al.*, 2013 (10 μ T). Parmi ces 6 études, uniquement Destefanis *et al.* (2015) ont trouvé un effet des champs basses fréquences lors d'une exposition continue. Cid *et al.* (2012) et Trillo *et al.* (2013) ont quant à eux observé un effet sur la prolifération, mais seulement si l'exposition était réalisée de façon intermittente. Malheureusement, ces études ne présentent pas de cohérence entre elles, car Destefanis *et al.* ont enregistré une diminution de la prolifération cellulaire, alors que l'équipe de Trillo et Cid ont décrit une augmentation.

Les articles analysés indiquent clairement que les chercheurs ont examiné l'impact des champs basses fréquences sur une myriade de fonctions cellulaires. On peut toutefois noter que ces fonctions ont souvent un lien avec la prolifération et la signalisation cellulaire (*cf.* Tableau 28). Suivant les tests effectués, les résultats sont très disparates et environ 60 % des analyses trouvent un effet des ondes sur une fonction cellulaire particulière. Pour les articles ayant utilisé des niveaux de champ électromagnétique supérieurs ou égaux à 1 mT, la proportion d'effets positifs monte à près de 95 %. L'existence d'un effet-dose ou d'un effet seuil n'est donc pas impossible, toutefois ce seuil limite est très difficile à déterminer. Cela tient à la très grande hétérogénéité des études. Elles utilisent toutes des modèles biologiques différents et emploient des protocoles d'exposition très variés (sans parler des méthodes d'analyse et des fonctions biologiques étudiées qui rajoutent encore un degré supplémentaire de variabilité). En 2016, Mansourian *et al.* ont réalisé une méta-analyse sur l'effet des champs basses fréquences sur l'apoptose. Cette étude met en évidence la forte hétérogénéité des expérimentations, mais parvient tout de même à confirmer statistiquement que l'exposition peut, dans certaines conditions, augmenter la mort de cellules cancéreuses ou normales en culture. Fait intéressant, les auteurs n'ont pas pu mettre en évidence d'effet-dose linéaire. De plus, la durée de l'exposition semble également devoir être prise en compte, ce qui complique de ce fait la détermination d'un seuil d'apparition d'effet.

Au final, l'analyse de ces nombreuses publications ne permet pas une extrapolation claire quant à l'effet potentiel de l'exposition environnementale sur l'Homme. De nombreux changements cellulaires sont rapportés dans la littérature, mais l'hétérogénéité des études et des observations empêche toute conclusion définitive.

Tableau 28 : récapitulatif des études sur la physiologie cellulaire (classement par ordre croissant d'intensité des champs électromagnétiques basses fréquences, puis de durée d'exposition)

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
Prolifération cellulaire	Cid <i>et al.</i> , (2012)	Lignée HepG2	50 Hz – 10 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 24, 42 & 90 h	Comptage cellules + Test incorporation 5-BrdU + détection PCNA	Augmentation de la prolifération
	Trillo <i>et al.</i> , (2013)	Lignée NB69	50 Hz – 10 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 42 h	Comptage cellules + dosage protéines et ADN total + détection PCNA	Augmentation de la prolifération
	Destefanis <i>et al.</i> , (2015)	Lignées SKBR3, GTL16, HT29 et A375P	50 Hz – 12 μ T Durée : 3 et 7 jours	Comptage des cellules après coloration et test de prolifération (dérivé du MTT)	Inhibition de la prolifération
	Trillo <i>et al.</i> , (2012)	Lignées HepG2 et NB69	50 Hz – 100 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 42 h	Comptage cellules + Test incorporation 5-BrdU + dosage protéines et ADN total	Augmentation de la prolifération Effet dépendant du type cellulaire lors de co-traitement
	Martinez <i>et al.</i> , (2012)	Lignée NB69	50 Hz - 100 μ T Par intermittence ou en continu Durée : 42 ou 63 h	Comptage cellules + Test incorporation 5-BrdU	Augmentation de la prolifération seulement si exposition par intermittence
Différenciation cellulaire	Cid <i>et al.</i> , (2012)	Lignée HepG2	50 Hz – 10 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 24, 42 & 90 h	Libération de l'albumine et expression de l'alpha-fœtoprotéine	Dédifférenciation des cellules HepG2

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
	Martinez <i>et al.</i> , (2015)	Cellules souches primaires isolées à partir du tissu adipeux humain	50 Hz – 100 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 42 h	Coloration spécifique des lipides intracellulaire (adipogenèse)	Diminution de l'accumulation des lipides
Apoptose	Destefanis <i>et al.</i> , (2015)	Lignées SKBR3, GTL16, HT29 et A375P	50 Hz – 12 μ T Durée : 3 et 7 jours	Apoptose par cytométrie de flux	Niveau constant
	Zhu <i>et al.</i> , 2014	Culture primaire de fibroblastes de l'œil (issus de fœtus humains)	50 Hz – 200 μ T Durée : 24 h	Viabilité cellulaire (test dérivé du MTT)	Effet cytotatique
	Sun <i>et al.</i> , (2010)	Culture primaire de trophoblastes humains	50 Hz - 200 et 400 μ T Durée : 48 & 72 h	Expression de gènes impliqués dans l'apoptose	Niveau constant
	Jia <i>et al.</i> , (2014)	Lignée PC12 En présence ou non de nanoparticules magnétiques	50 Hz – 400 μ T Durée : 48 h	Viabilité cellulaire (test MTT) Apoptose par cytométrie de flux (Iodure de propidium et Annexine V)	Augmentation de la mort cellulaire en présence des nanoparticules
	Borhani <i>et al.</i> , (2011)	Embryons dans des souris gestantes Organe : blastocytes	50 Hz – 500 μ T Durée : 2 semaines (4 h / J et 6 j / semaine)	Fragmentation de l'ADN par test TUNEL	Augmentation de la fragmentation de l'ADN

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
	Wen <i>et al.</i> , (2014)	Lignées BEL-7402 & HL7702 En présence ou non de nanoparticules magnétiques	100 Hz – 700 μ T Durée : 24 h	Viabilité cellulaire (test dérivé du MTT) Apoptose par cytométrie de flux (Iodure de propidium et Annexine V)	Augmentation de la mort cellulaire et effet synergique en présence des nanoparticules
Signalisation cellulaire	Sun <i>et al.</i> , (2012)	vésicules artificielles riches en canaux et pompes à calcium	60 Hz – 0,6 et 6,3 μ T Durée : 30 min	Flux calciques	Niveau constant
	Golbach <i>et al.</i> , (2015)	Lignées HL60 & PLB-985	50 Hz ou champ complexe de 4 fréquences – 5, 300 et 500 μ T Durée : 30 min à 5 jours	Concentration en calcium intracellulaire	Niveau constant
	Destefanis <i>et al.</i> , (2015)	Lignées SKBR3, GTL16, HT29 et A375P	50 Hz – 12 μ T Durée : 3 et 7 jours	Phosphorylation de ERK	Diminution des niveaux de phosphorylation pour ERK associés aux mitochondries
	Martinez <i>et al.</i> , (2012)	Lignée NB69	50 Hz – 100 μ T Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i> ou 5 min <i>on</i> / 10 min <i>off</i>) Durée : cinétique 30 min à 63 h	Phosphorylation ERK1/2	Augmentation transitoire de l'activation d'ERK1/2

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
	Song <i>et al.</i> , (2010)	Lignées RAW 264.7 & RBL-2H3	60 Hz – 100 µT et 1 mT Durée : 4 & 16 h	Activité des phospholipases PLA2, PLC et PLD	Niveau constant
	Hwang <i>et al.</i> , (2011)	Lignées RBL-2H3	60 Hz – 100 µT et 1 mT Durée : 4 & 16 h	Mobilisation intracellulaire en Ca ²⁺ Exocytose	Niveau constant Niveau constant
	Cui <i>et al.</i> , (2014)	Lignée HEK293 surexprimant les canaux Cav3.1, ou Cav3.2, ou Cav3.3	50 Hz – 200 µT Durée : 1 à 3 h	Activité des canaux calciques Cav3.1, Cav3.2 et Cav3.3 par patch-clamp Dosage ELISA de l'acide arachidonique (AA) et de la leucotriène E4 (LTE)	Inhibition des canaux calciques Augmentation de la concentration intracellulaire en AA et LTE
	He <i>et al.</i> , 2013	Culture primaire de cervelet de rats	50 Hz – 400 µT et 1 mT Durée : 10 min à 12 h	Activité des canaux sodiques par patch-clamp Dosage de l'activation de la phospholipase calcium-dépendante A2 (cPLA2) et de la PKA Dosage de l'acide arachidonique et de la prostaglandine E2	Activation des canaux sodiques Activation de ces voies de signalisation
	Percherancier <i>et al.</i> , (2015).	Lignée NIH3T3	50 Hz – 400 µT et 1 mT Durée : 24 h	Fonctionnalité des jonctions communicantes par FRAP	Niveau constant
Expression génétique	Bouwens <i>et al.</i> , (2012)	Lignée THP-1 et cultures primaires de macrophages et monocytes humains	50 Hz ou champ complexe de 4 fréquences – 5 µT Durée : 30 min	Niveaux en ARNm (RT-PCR) et en protéines (cytométrie) des cytokines IL-1b, IL-6, IL-8, TNF-a, IL-12p40, IL-10 et des facteurs NF-kb, et COX-2	Niveau constant

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
	Golbach <i>et al.</i> , (2015b)	Lignées HL60 & PLB-985	50 Hz ou champ complexe de 4 fréquences – 5, 300 et 500 µT Durée : 30 min à 5 jours	Niveaux en ARNm (RT-PCR) de gènes impliqués dans la différenciation des neutrophiles (<i>CD11b</i> , <i>TRPC6</i> , <i>IP3RT1</i> , <i>STIM1</i> , <i>Calmodulin</i> , <i>Arp2/3</i> , <i>Orai1</i>)	Niveau constant
	Destefanis <i>et al.</i> , (2015)	Lignées SKBR3, GTL16, HT29 et A375P	50 Hz – 12 µT Durée : 3 et 7 jours	Niveaux en ARNm (RT-PCR) de gènes impliqués dans la chaîne respiratoire mitochondriale (<i>COX II</i> , <i>Cox IV</i>) Niveaux protéiques de ERK, p53, cyt C, c-NEU, VDAC, PARP (<i>western-blot</i> après fractionnement cellulaire)	Niveau constant Niveaux totaux constant Diminution des niveaux mitochondriaux des facteurs p53 et cyt C
	Manzella <i>et al.</i> , (2015)	Culture primaire de fibroblastes de peau humaine	50 Hz – 100 µT Durée : 1 h	Niveaux en ARNm (RT-PCR) de gènes impliqués dans l'horloge circadienne (<i>BMAL1</i> , <i>PER2</i> , <i>PER3</i> , <i>CRY1</i> , et <i>CRY2</i>)	Modification de l'expression génétique en fonction des conditions expérimentales
	Kabacik <i>et al.</i> , (2013)	Souris (<i>in vivo</i>) Organe : moelle osseuse	50 Hz – 100 µT Durée : 2 h	Analyse transcriptomique par microarray	Pas de modification significative de l'expression génétique
	Martinez <i>et al.</i> , (2015)	cellules souches primaires isolées à partir du tissu adipeux humain	50 Hz – 100 µT Par intermittence (3 h <i>on</i> / 3 h <i>off</i>) Durée : 42 h	Niveaux protéiques de PPARγ, p-ERK1/2 et SOX9 (<i>western-blot</i> & immunocytochimie)	Modification de l'expression génétique
	Zhu <i>et al.</i> , (2014)	Culture primaire de fibroblastes de l'œil (issus de fœtus humains)	50 Hz – 100 µT à 1 mT Durée : cinétique de 6 à 48 h	Niveaux en ARNm (RT-PCR) de gènes impliqués dans la formation de la matrice extracellulaire (<i>COL1A1</i> , <i>TIMP2</i> , <i>FGF-2</i> , <i>MMP-2</i> , <i>TGF-β2</i>)	Modification de l'expression génétique

Fonction cellulaire	Références	Modèles biologiques	Exposition	Tests biologiques effectués	Principaux résultats observés sous exposition
	Fedrowitz, <i>et al.</i> (2012)	Rats F344 et Lewis (<i>in vivo</i>) Organe : glandes mammaires	50 Hz – 100 μ T Durée : 2 semaines (exposition continue)	Analyse transcriptomique par microarray	Très légère modification de l'expression génétique (9 et 14 gènes suivant les lignées de rat)
	Sun <i>et al.</i> , (2010)	Culture primaire de trophoblastes humains	50 Hz - 200 et 400 μ T Durée : 48 & 72 h	Expression de gènes impliqués dans l'apoptose	Niveau constant

7.2 Effets sur le système nerveux central et périphérique

Plusieurs équipes ont analysé l'impact d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cerveau et le système nerveux. Ces travaux sont très divers et n'ont pas tous la même finalité. Certains chercheurs ont étudié le rôle de l'exposition sur la genèse de certaines pathologies cérébrales, notamment des maladies neurodégénératives, alors que d'autres équipes ont plutôt analysé l'impact de l'exposition sur l'activité cérébrale, et par extension sur les capacités cognitives et le comportement.

7.2.1 Études en relation avec les pathologies cérébrales

7.2.1.1 Études en relation avec la maladie d'Alzheimer et les pathologies neurodégénératives.

L'équipe d'Akdağ a publié plusieurs études (Akdağ *et al.* 2010a et b, 2013 a et b) visant à évaluer les dommages cellulaires dus à une exposition chronique aux champs électromagnétiques basses fréquences (*cf.* § 7.1.3.2). Des rats Sprague Dawley mâles âgés de 4 mois ont été exposés à un champ à 50 Hz 2 h / jour, 7 jours par semaine, pendant 10 mois. Dans l'étude d'Akdağ *et al.* (2013a), des évaluations spécifiques ont été effectuées afin d'étudier les conséquences du stress oxydant sur un marqueur de la maladie d'Alzheimer, l'accumulation de protéine β -amyloïde, qui, sous forme de dépôts, constitue les plaques séniles ou plaques amyloïdes. Les paramètres mesurés ont été le malondialdéhyde, la carbonylation de protéines et la mesure de la protéine β -amyloïde (peptide A β 1-40). La carbonylation des protéines et le taux de malondialdéhyde sont augmentés suite aux expositions de 100 et 500 μ T mais aucune différence significative n'est constatée entre les 3 groupes d'exposition (0, 100 et 500 μ T) pour les taux de protéine β -amyloïde. Il n'y a pas de différence significative entre les groupes d'exposition à 100 et 500 μ T pour aucun des paramètres évalués.

L'équipe de Zhang a publié deux articles en relation avec les champs basses fréquences et un marqueur de la maladie d'Alzheimer sur des animaux sains. En 2013, Zhang *et al.* ont recherché dans quelle mesure ces champs et l'aluminium pouvaient avoir un effet synergique sur la genèse de troubles cognitifs et représenter un facteur de risque potentiel de la maladie d'Alzheimer, considérant que des effets délétères de l'aluminium sur la cognition et certaines maladies neurodégénératives ont été suggérés (Zhang *et al.*, 2013). Quatre groupes de rats ont été constitués : contrôle (sans exposition au champ - sans traitement AlCl₃), Al (sans exposition au champ, avec traitement AlCl₃), champ seul (50 Hz ; 100 μ T pendant 12 semaines), et exposition au champ + AlCl₃. L'évaluation de la mémoire spatiale a été réalisée en piscine de Morris (*cf.* § 7.2.3.1) et la concentration en protéine β -amyloïde dans le cortex cérébral et l'hippocampe a été mesurée. Une analyse histopathologique de l'hippocampe (sous-région CA1) et du cortex pariétal (au-dessus de l'hippocampe) a été réalisée en aveugle. Une altération de la mémoire (apprentissage et rappel) et des caractéristiques morphologiques (perte neuronale et augmentation de la densité en protéine β -amyloïde) a été constatée dans tous les groupes recevant de l'aluminium, mais aucune différence n'a été observée entre les groupes contrôles et exposés aux champs seuls. L'exposition concomitante aux champs et à l'aluminium n'entraîne pas plus d'effet que l'administration d'aluminium seul. Les auteurs concluent à une absence d'association entre l'exposition aux champs basses fréquences et l'apparition de marqueurs comportementaux, histologiques ou biologiques de la maladie d'Alzheimer, et une absence d'interaction entre les champs et l'aluminium. En 2015, la même équipe a étudié les effets d'une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les capacités d'apprentissage chez les rats (Zhang *et al.*, 2015). Vingt rats mâles adultes de la souche Sprague-Dawley ont été répartis dans deux groupes : un groupe d'exposition factice et un groupe exposé en continu à un champ de 100 μ T (50 Hz) pendant 12 semaines. L'exposition a été réalisée dans un appareil développé par les auteurs et bien décrit. Un apprentissage

spatial en piscine de Morris (*cf.* § 7.2.3.1), ainsi que l'analyse de la morphologie cérébrale (quantification des neurones après coloration hématoxylin-éosine) et la concentration de peptides β -amyloïde dans le cortex cérébral, l'hippocampe et le plasma ont été réalisés grâce à des dosages ELISA. Les résultats de ces expériences ne montrent aucun changement dans tous les paramètres investigués.

Liebl *et al.* ont recherché le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la maladie d'Alzheimer ou la sclérose latérale amyotrophique (SLA) (Liebl *et al.* 2015). Les chercheurs ont utilisé des modèles murins de maladie d'Alzheimer (souris APP23) et de SLA (souris exprimant 2 formes mutées de la Cu/Zn-superoxyde dismutase (SOD1^{G85R}, SOD1^{G93A})). Les souris mâles et femelles ont été exposées ou non (groupe témoin) à un champ (50 Hz, 1 mT) pendant 16 mois. L'exposition de 16 mois aux champs n'aggrave pas les déficits d'apprentissage et de mémoire spatiale des souris APP23. Cependant, il est à noter que, dans la piscine de Morris, la capacité d'apprentissage des souris APP23 non exposées (groupe témoin) est très faible, voire nulle. De ce fait, la comparaison des souris exposées avec ce groupe témoin ne peut mettre en évidence une capacité d'apprentissage encore plus réduite. Dans le cortex et l'hippocampe de ces souris modèles, les analyses biochimiques (dosages des peptides amyloïdes A β 40 et A β 42 et leur précurseur, l'APP), ainsi que l'analyse de l'activation gliale (un marqueur reconnu de pathologies cérébrales) sont équivalents entre les groupes exposés et non exposés. Dans le modèle SLA, l'apparition de la maladie a été mesurée par la perte de poids et le taux de survie des souris SOD1 à 8 ou 10 mois. De plus, l'activité de la SOD, l'activation gliale et la présence d'agrégats protéiques associés à HSP25 ont été quantifiées. Aucun de ces marqueurs ne diffère entre les groupes avec ou sans exposition aux champs. Les résultats ne montrent donc aucun effet des ondes électromagnétiques sur plusieurs paramètres associés à la maladie d'Alzheimer et à la SLA sur des souris modèles de ces pathologies.

Liu *et al.*, en 2015, ont recherché les effets d'une exposition aux champs basses fréquences (50 Hz ; 400 μ T ; 24 h / 24 h ; pendant 60 jours) sur un modèle de rat de la maladie d'Alzheimer (injection intrapéritonéale de D-galactose et injection intra-hippocampique de peptide A β ₂₅₋₃₅) à l'âge de 8 semaines (Liu *et al.* 2015). Quatre groupes d'exposition ont été constitués (16 animaux par groupe) : groupe contrôle (Cont), groupe exposé (BF), groupe Alzheimer (AD), groupe Alzheimer exposé (AD+BF). Les auteurs ont ensuite recherché les effets sur la mémoire spatiale (piscine de Morris), sur la morphologie cérébrale (coloration de Nissl, coupes histologiques du cerveau, région CA3 de l'hippocampe, mesure de densité optique) et une analyse protéomique dans l'hippocampe. Bien que le protocole de cette étude soit intéressant, de nombreuses limites méthodologiques n'ont pas permis de prendre en compte ses résultats. Les résultats du test en piscine de Morris montrent une variabilité intra-groupe très élevée, notamment au test de rappel. De plus, les rats des 3 groupes AD, BF et AD+BF ne se rappellent pas de la localisation de la plateforme au test de rappel, montrant l'absence d'apprentissage : ce qui est plutôt attendu après un seul essai par jour pendant 3 jours. Par ailleurs, contrairement aux conclusions avancées par les auteurs, les résultats concernant les dommages pathologiques de l'hippocampe ne sont pas soutenus par des statistiques solides.

Tableau 29 : Études en relation avec les maladies neurodégénératives

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Akdağ <i>et al.</i> , (2013a)	50 Hz ; 100 et 500 μ T ; 2 h / jour, 7 jours par semaine pendant 10 mois	Rats Sprague- Dawley mâles	Peptide β -amyloïde Carbonylation des protéines Malondialdéhyde dans le cerveau	n = 15 par groupe	Inchangé Augmenté Augmenté
Zhang <i>et al.</i> 2013	50 Hz ; 100 μ T pendant 12 semaines Administration d'aluminium <i>per os</i>	Rats Sprague- Dawley	Mémoire spatiale (Piscine de Morris) Peptide β -amyloïde Analyse histopathologique de l'hippocampe CA-1 et du cortex cérébral	n = 10 par groupe	Pas de différence entre le groupe AI seul et AI + exposition BF.
Zhang <i>et al.</i> 2015	50 Hz ; 100 μ T pendant 12 semaines	Rats Sprague- Dawley		n = 10 par groupe	Pas de différence entre le groupe exposé et non exposé.
Liebl <i>et al.</i> 2015	50 Hz, 1 mT pendant 16 mois	Souris APP23 (modèle de la maladie d'Alzheimer) Souris SOD (modèle de SLA)	Mémoire spatiale (Piscine de Morris) Peptide β -amyloïde et APP Test d'activation gliale (IBA1 et GFAP) Expression de SOD1 et activité de la dismutase Test d'agrégation protéique	n = 6 – 14 par groupe	Pas de différence dans aucun des paramètres entre le groupe exposé et non exposé que ce soit pour le modèle d'Alzheimer que pour le modèle de SLA.

7.2.1.2 Études en relation avec d'autres pathologies cérébrales.

Rauš *et al.* ont recherché si les champs électromagnétiques basses fréquences (50 Hz, 0,5 mT pendant 7 jours) avaient un effet sur le comportement moteur (Rauš *et al.*, 2012) et sur les lésions de l'hippocampe induites par une ischémie cérébrale chez la gerbille (Rauš *et al.*, 2013). L'ischémie a été réalisée par 10 min d'occlusion bilatérale de la carotide. Plusieurs groupes d'animaux ont été constitués : un groupe contrôle cage, un groupe *sham* ischémie (ayant subi une procédure chirurgicale mimant une ischémie), un groupe *sham* exposé, un groupe naïf (non opéré) exposé seul, un groupe ischémie seule, un groupe exposé ayant subi aussi une ischémie. Le système d'exposition réalisé par les auteurs délivre une exposition moyenne de 0,5 mT avec des variations selon la position dans la cage d'exposition allant de 0,2 à 2 mT. Au cours de l'expérimentation, l'exposition est contrôlée. L'exposition aux champs en continu a été de 7 jours et les effets sur l'hippocampe (volume, neurones en dégénérescence, astrocytes et microglie dans la région CA1) ont été estimés immédiatement et 7 jours après l'arrêt de l'exposition (Rauš *et al.*, 2013). Les effets sur la locomotion, les stéréotypies, les rotations et l'immobilité ont été mesurés à 1, 2, 4, 7 jours après la reperfusion (effets immédiats des champs) et 14 jours après la reperfusion (effets à distance, 7 jours après la fin des expositions aux champs (Rauš *et al.*, 2012). Dans les 2 études, les différentes mesures des 3 groupes contrôles ont été regroupées car similaires. L'analyse histologique quantitative en stéréologie de l'hippocampe montre que l'exposition aux ondes seules n'induit aucun changement morphologique, tandis que l'ischémie cérébrale de 10 min a entraîné une mort neuronale, une réponse gliale et astrocytaire dans la région CA1 de l'hippocampe, comme attendu, sans affecter le volume de l'hippocampe. Les gerbilles ischémiques exposées aux ondes présentaient moins de dégénérescence neuronale à 14 jours (effet retard des champs) et une plus grande réponse des astrocytes et des cellules microgliales à 7 jours (effet immédiat des champs) que les gerbilles avec ischémie mais sans exposition (Rauš *et al.*, 2013). L'étude de 2012 montre que l'ischémie induit une hyperactivité motrice (tous les paramètres, *i.e.*, locomotion, stéréotypies, rotation, immobilité) par rapport aux gerbilles contrôles. L'exposition aux champs inhibe le développement de cette hyperactivité sur toute la période étudiée, mais significativement uniquement aux deux premiers jours après la reperfusion. Ces données sont en accord avec des études plus anciennes (Grant *et al.*, 1994, Zhao *et al.*, 2003). Ces 2 études de qualité montrent que l'exposition aux ondes basses fréquences possède une fonction neuroprotectrice par : i) la réduction de l'hyperactivité motrice induite par l'ischémie et, ii) la réduction de la mort neuronale et l'activation de la réponse inflammatoire dans une région cérébrale particulièrement sensible qu'est l'hippocampe. Les auteurs proposent une nouvelle stratégie thérapeutique de prise en charge de l'ischémie par les champs seuls ou combinés à des agents pharmacologiques appropriés.

Alsaeed *et al.* (2014) ont recherché le lien entre les troubles du spectre de l'autisme et l'exposition aux champs basses fréquences. Ils ont examiné les effets d'une exposition périnatale aux champs sur des paramètres comportementaux liés à l'autisme chez la souris BALB/c. Huit animaux ont été exposés et 9 animaux constituaient le groupe témoin. L'exposition a été réalisée par un appareillage développé par les auteurs, dont la description est assez complète et dont la production d'ondes a été vérifiée et mesurée. L'exposition a été réalisée avec des champs magnétiques à 50 Hz d'intensité 1 mT, les animaux ont été exposés au cours de la dernière semaine de gestation et durant la semaine qui suit la naissance. De nombreux tests comportementaux ont ensuite été effectués en aveugle lorsque les animaux ont été âgés de 8 à 11 semaines. La sociabilité de l'animal a été

évaluée dans le test de paradigme à trois chambres⁶¹, l'activité locomotrice et l'anxiété dans un champ ouvert⁶² et dans le labyrinthe en croix surélevé⁶³, le comportement exploratoire par le test de la planche à trous⁶⁴, et la coordination motrice et l'équilibre dans un rotarod. L'olfaction a été aussi évaluée par un test olfactif d'habituation et de déshabituation. De ces expériences, il ressort que les animaux exposés ont une activité sociale diminuée et une baisse de l'activité exploratrice. En revanche, dans les tests d'activité locomotrice, d'anxiété et d'olfaction, les performances restent équivalentes entre les exposés et les non exposés. Les auteurs concluent que ces résultats, bien qu'intéressants, ne permettent pas de relier l'exposition à des ondes et l'apparition et/ou la progression de l'autisme spécifiquement, car d'autres conditions comme la dépression, la schizophrénie ou les pathologies anxieuses présentent aussi des altérations de l'affiliation sociale ou de motivation par exemple.

Gutiérrez-Mercado a publié en 2013 (Gutiérrez-Mercado *et al.*, 2013) un article visant à étudier les effets des champs basses fréquences sur la perméabilité des capillaires cérébraux au niveau des organes péri-ventriculaires (ex : neurohypophyse, glande pinéale, éminence médiane...) ayant une barrière plus simple que celles des structures du système nerveux central, ainsi que dans 2 régions cérébrales, l'hippocampe et le cortex sensorimoteur. Pour cette étude, trois groupes de 32 rats mâles Wistar (250 g de masse corporelle) ont été utilisés : un groupe témoin (sans traitement) ; un groupe avec exposition factice et un groupe expérimental exposé à 0,66 mT, 2 h/jour, pendant 10 jours. L'exposition est « classiquement » réalisée à l'aide de bobines de Helmholtz. La perméabilité membranaire aux substances non liposolubles est évaluée par l'utilisation de carbone colloïdal et la structure des capillaires a été étudiée. Dans cette étude, l'exposition aux champs entraîne un effet vasodilatateur (augmentation de la surface capillaire) ainsi qu'une augmentation de la perméabilité vasculaire au niveau des organes péri-ventriculaires, cet effet est également observé au niveau de la barrière hématoencéphalique (hippocampe et cortex). Les résultats de cette publication sont convaincants, en revanche, il manque une tentative d'explication, ce travail reste purement descriptif et aucun mécanisme n'est proposé pour expliquer ces changements de comportement des vaisseaux.

⁶¹ Le test de paradigme à trois chambres est constitué de trois compartiments contigus et communicants. Dans un des compartiments sans issue est placé un animal dans une cage (souris de stimulation) et dans l'autre une cage vide. La souris d'essai est placée dans le compartiment du milieu. La sociabilité de la souris d'essai est évaluée par le temps consacré près de la souris de stimulation par rapport au temps passé près de la cage vide. Ce test est utile pour quantifier les déficits dans le comportement social chez les animaux transgéniques présentant, entre autres, des traits autistiques.

⁶² Le test du champ ouvert ou *open field* est constitué d'un espace ouvert quadrillé au sol avec des parois hautes dans lequel l'animal se déplace librement. Il permet de mesurer l'activité générale (locomotion, redressement, toilettage) ainsi que le niveau d'anxiété (défécations, déplacement le long des parois versus le centre du test).

⁶³ Le labyrinthe de la croix surélevée, ou *plus maze*, comprend deux branches « fermées » et deux branches « ouvertes » situées en hauteur (environ 80 cm du sol). Il permet de mesurer l'anxiété d'un animal par le nombre de visites des branches « ouvertes » (lumineuses et donc anxiogènes pour le rongeur) et celui de visites des branches fermées (peu éclairées grâce à des parois hautes et rassurantes pour un rongeur).

⁶⁴ Le test de la planche à trous est une planche surélevée dans laquelle des trous ont été percés pour permettre à la souris de passer la tête et voir ce qui a été placé en dessous. Il permet d'évaluer le comportement exploratoire des souris.

La majorité de ces travaux visait à rechercher un lien entre la maladie d'Alzheimer et l'exposition aux ondes électromagnétiques basses fréquences. Sur cette pathologie, toutes ces études concluent à une absence de lien entre l'exposition et le développement de la maladie. En conclusion, l'effet, parfois évoqué, des ondes sur l'apparition de la maladie d'Alzheimer, ne ressort pas de ces études.

Peu d'études ont été consacrées aux autres pathologies cérébrales. En ce qui concerne la sclérose latérale amyotrophique (SLA), une seule étude s'est penchée sur le sujet au cours de la période 2010-2015 (Liebl *et al.*, 2015). Bien que les auteurs aient utilisé un modèle murin spécifique pour l'étude de cette pathologie (souris SOD1), aucun lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de la SLA n'a été mis en évidence. La situation est identique pour l'autisme, avec une seule étude (Alsaeed *et al.*, 2014) où les animaux sains exposés montraient une activité sociale et exploratoire diminuée, sans pour autant pouvoir permettre de relier l'exposition à l'apparition ou à la progression de paramètres pouvant être mis en lien avec l'autisme. Enfin, une étude (Gutiérrez-Mercado *et al.*, 2013) a montré une augmentation de la perméabilité vasculaire dans le cerveau et les organes péri-ventriculaires des animaux exposés. Ces résultats suggèrent une possible influence de l'exposition aux champs sur la barrière hémato-encéphalique, mais pour des niveaux d'intensité forts (0,66 mT).

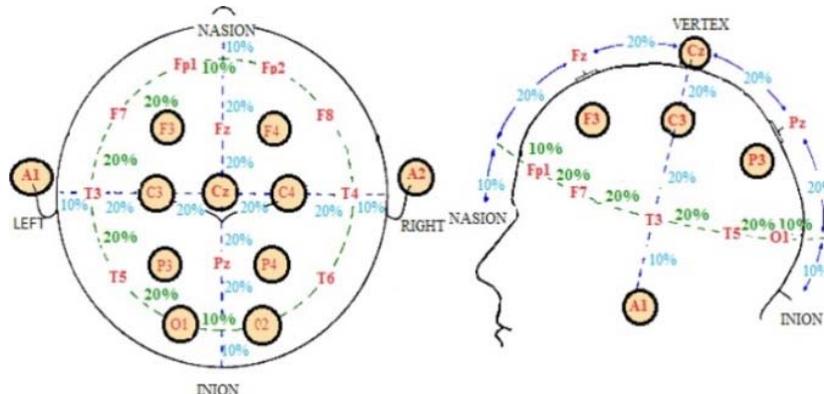
Tableau 30 : Études en relation avec d'autres pathologies cérébrales

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux	Résultats (se référer au texte pour les commentaires)
Rauš <i>et al.</i> 2012	50 Hz, 0,5 mT pendant 7 jours Ischémie cérébrale (10 min d'occlusion bilatérale de la carotidienne)	gerbille	Effets comportementaux : locomotion, stéréotypies, rotations et immobilité ont été mesurés à 1, 2, 4, 7 et 14 jours après la reperfusion.	6 – 8 par groupe	Diminution de l'hyperactivité motrice liée à l'ischémie significative pour les deux premiers jours après reperfusion.
Rauš <i>et al.</i> 2013	50 Hz, 0,5 mT pendant 7 jours Ischémie cérébrale (10 min d'occlusion bilatérale de la carotidienne)	gerbille	Volume, neurones en dégénérescence, astrocytes et microglie dans la région CA1 de l'hippocampe analyses réalisées immédiatement et 7 jours après la fin de l'ischémie.	6 – 8 par groupe	Diminution de la dégénérescence neuronale à 14 jours et réponse augmentée des astrocytes et des cellules microgliales à 7 jours chez les gerbilles ischémiques exposées aux ondes par rapport aux gerbilles ischémiques non exposées.
Alsaeed <i>et al.</i> , 2014	50 Hz ; 1 mT ; dernière semaine de gestation et durant la semaine qui suit la naissance	souris	Sociabilité, activité locomotrice, anxiété, comportement exploratoire, olfaction.	8 - 9	Activité sociale diminuée et une baisse de l'activité exploratrice. Activité locomotrice, anxiété et olfaction inchangés.

1 7.2.2 Études sur l'activité électrique cérébrale

2 7.2.2.1 *Rappels et définitions*

3 **L'électroencéphalogramme** (EEG) est généralement enregistré, de façon non invasive, au
 4 niveau du scalp, à l'aide d'électrodes disposées selon une topographie codifiée, dont la plus
 5 connue et la plus fréquemment utilisée est celle du système international 10-20 (cf. Figure 11
 6 ci-dessous et rapport Anses « radiofréquences et santé » 2013 Chapitre 7.1.5 « L'activité
 7 électrique cérébrale » page 167 pour plus de détails). Sur le tracé EEG sont visualisées
 8 différentes ondes cérébrales caractéristiques de l'activité cérébrale associées à nos
 9 différents niveaux de conscience et de vigilance : les ondes delta (0,5 – 4 Hz, sommeil
 10 profond), les ondes thêta (4 – 8 Hz, relaxation profonde, méditation, rêverie, associées
 11 notamment au système limbique pour le traitement des informations en lien avec la mémoire
 12 et les émotions), les ondes alpha (8 – 13 Hz, veille calme [yeux fermés], relaxation légère,
 13 méditation), les ondes bêta (13 – 30 Hz, veille active, attention au monde qui nous entoure,
 14 prise de décision) et ondes les gamma (> 30 Hz, veille très active, activité mentale intense et
 15 synchronisée, apprentissage, création).



16 **Figure 11 : le système international 10-20 pour le positionnement des électrodes utilisées pour**
 17 **un électroencéphalogramme**

18 Positions : Centrales (Cz, Fz, Pz),

19 Frontal (F3, F4), Temporal (T3, T4),

20 Pariétal (P3-P4), Occipital (O1, O2)

21
 22
 23 **Les potentiels évoqués** (PE, ou *event related potentials, ERP*) sont des signaux
 24 extrêmement faibles (de l'ordre du microVolt) issus de l'EEG, émis par le cerveau en
 25 réponse à un *stimulus* particulier, exogène ou endogène. Ils sont caractérisés par leur
 26 positivité ou leur négativité par rapport à la ligne de base et par leur délai d'apparition. Par
 27 exemple la P300 est une onde positive, survenant aux alentours de 300 ms après le début
 28 de la stimulation lorsque le sujet doit détecter des *stimuli* « cibles » au sein d'une série de
 29 *stimuli* différents, appelés distracteurs, généralement plus nombreux que les *stimuli*
 30 « cibles » (tâche dite de *oddball*). Il existe de nombreux PE exogènes : potentiels évoqués
 31 visuels (PEV), potentiels évoqués auditifs (PEA), potentiels évoqués somesthésiques (PES)
 32 et potentiels évoqués moteurs qui utilisent un stimulus extérieur. Ces potentiels évoqués
 33 exogènes sont précoces, alors que les potentiels évoqués endogènes, liés aux activités
 34 cognitives, sont plus tardifs (cf. Rapport Anses 2013 Chapitre 7.1.5 « L'activité électrique
 35 cérébrale » page 167 pour plus de détails).

36
 37 **L'IRMf ou imagerie par résonance magnétique fonctionnelle**, principalement par la
 38 méthode BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*), est une technique non invasive qui
 39 détecte les variations locales d'oxyhémoglobine (O₂Hb) et fournit en 3D un index de
 40 perfusion très proche du débit sanguin, avec une résolution temporelle inférieure à la minute.

1 7.2.2.2 Études cliniques sur l'activité du cerveau

2 Robertson *et al.* (2010) se sont intéressés aux phénomènes de magnétoréception en
3 étudiant l'analgésie induite par les champs magnétiques pulsés basses fréquences
4 (PELFMF) de l'appareil IRM (exposition 200 μ T). À partir des données montrant l'existence
5 d'une modulation de la sensibilité à la douleur induite par champs très basses fréquences
6 chez l'animal et l'Homme (Del Sepia *et al.*, 2007), les auteurs ont étudié les effets des
7 PELFMF sur la nociception induite par une douleur thermique cutanée aiguë au cours de 10
8 sessions (chaleur « on » 21 s, chaleur « off » 24 s) sur 31 sujets volontaires sains (groupe
9 exposé : 6 femmes / 8 hommes, âge $32,2 \pm 2,7$ ans, groupe sham : 9 femmes / 8 hommes,
10 âge $27,6 \pm 1,5$ ans). Le score de douleur est évalué par une échelle verbale (1 à 10), la
11 température étant ajustée individuellement à une douleur subjective d'au moins 7/10
12 (température entre 48 et 51°C). Après chaque session, les sujets au repos dans l'IRM étaient
13 soumis pendant 15 min soit à une exposition aux PELFMF, soit à une exposition factice
14 (exposition en aveugle pour les sujets). Les résultats ne montrent aucun effet des champs
15 magnétiques sur la douleur subjective (score verbal) mais une diminution de l'activation des
16 structures cérébrales associées à la composante affective de la douleur (cortex cingulaire
17 antérieur, insula, hippocampe, noyaux caudés) chez les sujets exposés aux PELFMF. Pour
18 ces auteurs, l'environnement de l'IRM, par ses champs magnétiques pulsés, pourrait induire
19 des phénomènes de neuromodulation (ici baisse de l'activité cérébrale en réponse à la
20 douleur).

21 Carrubba *et al.* (2010) ont étudié chez 22 sujets - 10 hommes (23 - 61 ans) et 12 femmes
22 (22 - 58 ans) - les effets des champs basses fréquences (60 Hz sinusoïdal, intensité 1 ou
23 5 μ T) sur les potentiels évoqués (PEs, 6 positions : occipitale, O1-2, centrale, C3-4 et
24 pariétale P3-4) en utilisant une analyse du signal EEG non linéaire, inspirée des théories du
25 chaos et qui accorde une attention particulière à la dimension temporelle, négligée dans les
26 analyses de fréquences classiques (Gallois *et al.*, 2000). Le signal est généré par 2 jeux de 3
27 bobines coaxiales, coplanaires, chaque jeu consiste en une bobine circulaire et 2 bobines
28 carrées. Les bobines sont entourées de papier d'aluminium mis à la terre pour éliminer le
29 champ électrique 60 Hz (< 1 V/m), la variation spatiale est inférieure à 5 % dans la zone
30 d'exposition. Les résultats montrent une détection des PEs chez 91 % des sujets à 5 μ T et
31 73 % à 1 μ T (localisation O1-2 et P3). Les PEs apparaissent immédiatement au début et à la
32 fin de l'exposition, comme observé dans les phénomènes de transduction sensorielle. Les
33 PEs ne sont pas détectables sur l'EEG avec une méthode de « moyennage » des temps
34 (méthode classique par FFT⁶⁵), car ils ont une origine non linéaire. Pour les auteurs, cet effet
35 est robuste (presque tous les sujets ont une amplitude des PEs > 30 %) et montre que les
36 champs électromagnétiques de l'environnement sont détectés *via* un système de
37 transduction sensorielle, comme d'autres agents stressants (chaleur, bruit, lumière, *etc.*).
38 Ces données confirment celles d'une étude précédente (Carrubba *et al.*, 2007) dans laquelle
39 les auteurs suggéraient l'existence d'un sens magnétique chez l'Homme. Ces données sont
40 également en accord avec la théorie du stress (*stressor theory*) dans laquelle la transduction
41 sensorielle serait la première étape de la réponse au stress. Ce phénomène serait d'ordre
42 biologique, sans indication de causalité avec la pathologie.

43 7.2.2.3 Le cas particulier du Neurofeedback

44 Le *neurofeedback* consiste en un entraînement comportemental qui implique apprentissage
45 et concentration pour volontairement renforcer et moduler les réseaux neuronaux
46 fonctionnels en utilisant l'EEG comme *feedback*. C'est une forme de stimulation neuronale
47 endogène basée sur l'existence de corrélation entre l'activité cérébrale et le comportement,
48 les amplitudes des ondes cérébrales mesurées par l'EEG étant elles-mêmes corrélées au

⁶⁵ FFT ; *Fast Fourier Transform*, i.e. transformée de Fourier rapide, permettant de passer de l'espace temporel à l'espace fréquentiel, et inversement.

1 degré de synchronisation neuronale intra-corticale (Sitaram *et al.*, 2017). Par exemple, la
2 réduction de l'amplitude EEG dans la région pariétale-occipitale est le signe d'une
3 stimulation de l'attention, ce qui améliore les performances musicales ou dans une tâche de
4 rotation mentale⁶⁶. L'objectif du *neurofeedback* est d'amener le sujet à contrôler lui-même
5 son EEG en temps réel afin de moduler l'activité de circuits cérébraux spécifiques et corriger
6 ou améliorer certains comportements ou dysfonctionnements pathologiques ; le sujet
7 « s'auto-administre » sa thérapie. Cela nécessite un apprentissage utilisant divers outils
8 comme des instructions verbales ou stratégies mentales (ex. imagerie mentale). Les
9 améliorations dues à ces exercices de *neurofeedback* peuvent être durables et mettent en
10 jeu des processus de réorganisation fonctionnelle cérébrale témoignant de la mise en place
11 d'une neuroplasticité avec des changements de l'excitabilité corticale. Il a été observé des
12 altérations (spatio-temporelles) des signaux EEG au sein de certains réseaux neuronaux
13 (ex : réseau par défaut, réseau du contrôle exécutif, réseau de la saillance) communs à de
14 nombreuses pathologies psychiatriques ou neurologiques (Alzheimer, schizophrénie,
15 addiction...) ou troubles du comportement (Menon, 2011). Ainsi, la correction ou modification
16 de l'EEG par *neurofeedback* est une des méthodes thérapeutiques utilisées en psychiatrie et
17 en psychologie afin de soigner certaines pathologies telles que les migraines, la dépression,
18 l'anxiété, les maux de tête, etc. Cependant, de nombreuses études pointent l'existence d'un
19 effet placebo avec des effets comparables obtenus en *sham-feedback* (le *feedback* ne
20 dérivant pas de l'activité du sujet mais de celle d'un autre sujet, ou du même sujet mais
21 d'une autre région cérébrale (Thibault *et al.*, 2016). Ces auteurs concluent que le
22 *neurofeedback*, une pratique dans l'air du temps, présente souvent des défauts
23 méthodologiques ne permettant pas d'établir la spécificité de la réponse, alors que d'autres
24 facteurs pourraient participer à la réponse et mériteraient d'être étudiés. Enfin, cette
25 technique ne réussit pas avec tous les sujets (jusqu'à 30 % de non succès).

26 Un consortium de chercheurs a publié 5 études sur l'impact d'une exposition aux champs
27 électromagnétiques basses fréquences sur le phénomène de *neurofeedback*.

28 Shafiei *et al.* (2012) ont étudié sur 19 hommes ($25,6 \pm 1,6$ ans) les effets d'une exposition
29 locale (en position centrale Cz sur le scalp) à un signal basse fréquence (100 μ T, fréquences
30 3, 5, 10, 17, 45 Hz) sur l'EEG (5 électrodes, Cz, frontal F3 et F4 et temporal T3 et T4). Le
31 système d'exposition consiste en un champ magnétique localisé sur le scalp qui est généré
32 par de petites bobines placées sur la tête à différentes positions (selon le référentiel EEG 10
33 - 20). La densité du flux magnétique est mesurée par un *Gauss-meter* sous l'axe de la
34 bobine. Le système d'exposition et les mesures apparaissent de qualité, mais les
35 perturbations du champ magnétique par les électrodes EEG ne sont pas évaluées. Les
36 sujets ont passé 2 sessions de 120 min incluant 5 x 2 x 2 min d'exposition aux champs
37 basses fréquences ou factice. L'analyse de l'EEG a utilisé une méthode classique (FFT) de
38 traitement du signal. Les auteurs n'ont pas observé, au niveau du point exposé Cz, d'effet de
39 résonance, pas d'effet sur l'EEG 10 min après l'exposition et le plus souvent pas d'effet
40 immédiat des champs basses fréquences aux différentes fréquences. En revanche, des
41 effets à distance enregistrés au niveau des électrodes F3, F4, T3 et T4 (augmentation ou
42 diminution) sur tous les types d'ondes cérébrales (alpha, bêta, thêta, gamma et delta) ont été
43 observés en fonction de la localisation, de la fréquence et du point exposé. Les auteurs
44 soulignent le besoin d'expériences supplémentaires avec des intensités < ou > 100 μ T.

45 Amirifalah *et al.* (2013), dans une étude similaire à la précédente, ont étudié chez 10 femmes
46 (22-30 ans), l'impact des champs basses fréquences (200 μ T, 10, 14 ou 18 Hz, signal
47 impulsionnel) appliqués sur 2 régions centrales simultanément (C3, C4) sur les ondes
48 cérébrales de type bêta, delta et SMR (rythmes sensorimoteurs) en position C3, C4 et Cz. Le
49 système d'exposition est similaire à celui utilisé par Shafiei *et al.* (2012). Les expériences ont

⁶⁶ Une tâche de rotation mentale consiste à mesurer la capacité à reconnaître un objet dans l'espace vu sous des angles différents, sur une feuille ou un écran, par exemple.

1 consisté en une session d'exposition factice et une session d'exposition réelle en aveugle,
2 d'une durée de 65 min chacune, avec une exposition aux champs basses fréquences de
3 3 min / fréquence et une analyse EEG classique (FFT). L'étude confirme les données
4 précédentes (Shafiei *et al.*, 2012) sur l'absence d'effets de résonance. Elle montre
5 également une baisse de la puissance absolue des ondes bêta, thêta et SMR après
6 l'exposition aux basses fréquences aux 3 localisations étudiées (effet plus marqué à 10 Hz)
7 indiquant une baisse de l'activité corticale. Les auteurs font le lien avec l'augmentation de la
8 puissance des ondes thêta et delta dans les déficits attentionnels (tels que le trouble du
9 déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité), ou l'augmentation de la puissance des
10 ondes bêta dans les zones centrales dans l'anxiété, soulignant l'intérêt potentiel de ce type
11 d'approche en thérapeutique.

12 Dans une étude de provocation très similaire à celle de 2012, Shafiei *et al.* (2014) ont étudié,
13 sur 20 hommes ($23,5 \pm 2,5$ ans), l'impact des champs basses fréquences en exposition
14 locale (5 localisations, 1 centrale, 2 frontales et 2 pariétales, 5 fréquences [3, 5 10, 17 et
15 45 Hz], 3 intensités [100, 240, 360 μ T]) sur l'EEG. Le système d'exposition est similaire à
16 celui décrit dans l'étude de Shafiei *et al.* (2012). Les résultats ne montrent pas d'effet de
17 résonance et mettent en évidence globalement une baisse de la puissance des ondes alpha
18 et bêta (toutes intensités et positions), une augmentation de la puissance des ondes lentes
19 delta et thêta et une absence d'effet sur les ondes rapides de type gamma. Aucun effet
20 régulier n'est mis en évidence quand l'intensité augmente de 100 à 360 μ T, mais à cette
21 dernière intensité, moins de variations sont observées.

22 Enfin, Zandi Mehran *et al.* (2013 et 2015) ont étudié chez 22 et 24 sujets (4 et 6 femmes, 18
23 hommes [âge moyen 25,1 et 23,5 ans]) les effets bénéfiques de la combinaison du
24 *neurofeedback* (NF, jeu vidéo course de bateaux) avec une exposition à un champ
25 magnétique basse fréquence sinusoïdal (45 Hz, 360 μ T) au niveau du cortex frontal (F3) ou
26 de la région centrale (Cz) sur l'attention et l'EEG (ondes bêta et thêta en position centrale,
27 Cz). Le système d'exposition est similaire à Shafiei *et al.* (2012). L'objectif était d'augmenter
28 l'activité des ondes bêta (15-18 Hz) et de diminuer simultanément celle des ondes thêta (4-
29 7 Hz) et bêta haut (22-30 Hz). Ils ont étudié le rapport thêta / bêta sur 10 sessions
30 comprenant 3 périodes : pré, pendant (10 min d'entraînement NF) et post exposition. Seize
31 sujets ont été exposés aux champs basses fréquences et 8 sujets ont subi une exposition
32 factice avec la bobine placée sur la tête. L'EEG a été analysé par la méthode *Wavelet*
33 *Packet* (WP) permettant d'analyser plus précisément la distribution du signal EEG en temps
34 et en fréquence. Les résultats montrent : i) une baisse du rapport thêta / bêta qui
35 accompagne une amélioration des performances attentionnelles (précision) pendant le NF
36 (groupe d'exposition factice) par rapport aux périodes pré et post exposition, et ii) que la
37 combinaison NF + BF diminue significativement le rapport thêta / bêta et améliore l'attention
38 en comparaison au groupe NF seul. Cet article qui décrit un nouveau système appelé
39 « *Neuro-ELF system* » présente pour les auteurs l'avantage d'un meilleur contrôle sur
40 l'objectif à atteindre du NF (baisse du rapport thêta / bêta) avec un impact moindre des
41 caractéristiques de la personne, comme son QI, dans ce type d'approche comportementale
42 qui peuvent affecter l'efficacité du NF.

43 7.2.2.4 Études sur l'activité cérébrale dans des modèles animaux

44 Suite à une étude de 2012 où Elmas et Comlekci n'ont pas retrouvé d'effet d'une exposition
45 à court terme à un champ de 1 μ T sur l'électrocardiogramme (ECG) de rats (Elmas *et al.*,
46 2012) comme précédemment dans la littérature, les auteurs ont donc réitéré l'expérience
47 avec un champ magnétique un peu plus intense (0,3 mT) pour évaluer les effets aigus sur le
48 système nerveux central, périphérique et autonome (Elmas et Comlekci, 2015). Ils ont
49 exposé des rates (femelles) Wistar albinos (10 par groupe) à un champ magnétique basse
50 fréquence à 50 Hz pendant 2 min. Un EEG et un ECG ont été réalisés, ainsi qu'une mesure
51 de la vitesse de conduction nerveuse et la variabilité du rythme cardiaque. Le rat est
52 anesthésié et placé dans l'appareillage générant les ondes (éteint dans un 1^{er} temps). Les
53 enregistrements (EEG et ECG) débutent 18 min après l'anesthésie, moment où l'anesthésie

1 interfère le moins avec les paramètres physiologiques. À la 22^{ème} min, le système
2 d'exposition est mis en marche pendant 2 min. L'enregistrement prend fin à la 24^{ème} min.
3 Ainsi, tous les enregistrements comprennent trois périodes distinctes : avant (18^{ème} – 20^{ème}
4 min après l'anesthésie), pendant (20^{ème} – 22^{ème} min après l'anesthésie) et après l'exposition
5 (22^{ème} – 24^{ème} min après l'anesthésie). Le groupe de rats contrôles subit la même procédure,
6 mais l'appareil n'est pas mis en marche à la 20^{ème} min post-anesthésie. Aucune modification
7 des paramètres évalués de l'EEG et de l'ECG, ainsi que de la vitesse de conduction
8 nerveuse n'a été constatée pendant et après l'exposition.

9 L'étude de Kantar Gok *et al.* avait pour objectif de rechercher d'une part des changements
10 éventuels dans le fonctionnement cérébral évalué en EEG par la mesure des différentes
11 composantes des potentiels évoqués (PE) auditifs en réponse à une tâche *oddball*, et d'autre
12 part la génération de stress oxydant dans le cerveau, à la suite d'une exposition à des ondes
13 électromagnétiques (Kantar Gok *et al.*, 2014). Le paradigme *oddball* consiste à faire
14 entendre à l'animal des stimuli auditifs standards identiques (n = 900) et occasionnellement
15 des stimuli légèrement déviants (n = 100) de manière aléatoire (*cf.* § 7.2.1.1, potentiels
16 évoqués), la négativité de discordance ou MMN (*mismatch negativity*)⁶⁷ correspondant à la
17 réponse du cerveau dans les 150 à 250 ms après le stimulus déviant. Le système utilisé
18 pour exposer les animaux est un appareil développé par les auteurs dont l'uniformité et
19 l'homogénéité du signal ont été vérifiées. Des rats mâles Wistar ont été exposés à un champ
20 électrique (50 Hz), d'intensité 12 ou 18 kV/m, 1 h / jour pendant 2 ou 4 semaines. Les
21 potentiels évoqués ont été mesurés chez le rat anesthésié, dont la négativité de
22 discordance. Les paramètres en relation avec le stress oxydant sont détaillés dans le
23 paragraphe 7.1.3. L'ensemble de ces protocoles semble bien maîtrisé. Les données
24 présentées dans cet article montrent des différences en matière de latence et d'amplitude
25 des différents PE observés (N1, P1, N2, P2) en réponse aux stimuli standards et déviants de
26 la tâche *oddball* chez les rats exposés par rapport aux témoins : ces effets dépendent de
27 l'intensité et de la durée de l'exposition. L'amplitude de la MMN reflétant la différence entre
28 les PE en réponse aux sons standards vs PE en réponse aux sons déviants, est diminuée
29 dans le groupe exposé pendant 4 semaines à 18 kV/m par rapport aux rats contrôles. Pour
30 les auteurs, une telle exposition réduit les processus de traitement des informations
31 auditives, et suggèrent que l'augmentation de la peroxydation lipidique observée chez les
32 rats exposés pourrait y avoir un rôle. Enfin, les effets cognitifs des champs basses
33 fréquences dépendent de leur durée et intensité.

34 El-Gohari *et al.* (2013) ont étudié l'influence d'une exposition aux champs basses fréquences
35 et d'un traitement chronique à la caféine (dose compatible avec la consommation
36 quotidienne chez l'Homme) sur l'EEG. Pour cela, 4 groupes de rats mâles ont été
37 constitués : contrôles, caféine (10 mg/kg pendant 15 jours), champs basse fréquence
38 (0,2 mT, 3 h / j pendant 15 jours) et champs basses fréquences + caféine (15 jours). L'EEG a
39 été enregistré au niveau des cortex visuel et moteur aux jours 5, 10 et 15 pendant les
40 expositions et aux jours 5, 10 et 15 après la fin des expositions et traitements. Les résultats
41 montrent que l'exposition aux champs augmente la puissance moyenne dans presque toutes
42 les bandes de fréquences (alpha, delta, thêta) dans le cortex moteur, et diminue ce même
43 paramètre dans le cortex visuel. La caféine réduit ces effets surtout dans le cortex visuel et à
44 un degré moindre dans le cortex moteur. Cependant, l'absence d'analyses statistiques et la
45 présence d'une variabilité relativement importante pour certaines données affaiblissent la
46 portée de ces résultats.

⁶⁷ La négativité de discordance est un potentiel évoqué induit par l'apparition d'un son différent (déviant) dans une série de sons standards répétés. Le son déviant fait apparaître une onde négative additionnelle entre 150 et 250 ms après son début. La négativité de discordance est intéressante car elle pourrait refléter la manifestation d'un mécanisme de détection automatique des changements. Elle reflète la capacité des régions auditives du cerveau à traiter différentes caractéristiques des sons comme l'intensité, la fréquence et la durée.

1 7.2.2.5 Conclusions

2 Plusieurs études indiquent, chez l'Homme et chez le rat, une possible interférence des
3 champs électromagnétiques basses fréquences avec l'activité électrique cérébrale. Chez
4 l'Homme, ces résultats ont été obtenus par plusieurs laboratoires indépendants, utilisant des
5 techniques différentes, (soit l'IRMf, soit l'EEG). Pour Carrubba *et al.*, (2009), cette sorte
6 d'interférence relèverait d'un système de transduction sensorielle similaire à celui mis en
7 place pour d'autres types de stimuli de l'environnement (ex : visuels, auditifs...). L'équipe
8 d'Alex Thomas au Canada (Robertson *et al.*, 2010) émet l'hypothèse d'une modulation de la
9 plasticité synaptique par les basses fréquences qui impacterait l'activité cérébrale, ce qui
10 serait en accord avec les résultats sur la plasticité synaptique (paragraphe 7.2.4). Enfin, les 5
11 études du groupe de Shafiei, Zandi-Mehran et leurs collaborateurs ont cherché à démontrer
12 les effets bénéfiques, potentiellement thérapeutiques, des champs basses fréquences, seuls
13 ou combinés, au *neurofeedback* en application locale sur le scalp. Elles n'ont pas montré
14 d'effet de résonance (au niveau du site de stimulation), mais seraient en faveur, et de
15 manière consistante, d'effets à distance de la stimulation par des champs basses fréquences
16 sur les différents rythmes EEG (alpha, bêta, thêta et delta), dans le sens d'une augmentation
17 ou d'une baisse de l'amplitude du signal. Cependant, ces modifications pourraient ne pas
18 être reproductibles (voir incohérences des données obtenues à l'intensité de 100 μ T entre
19 les études de Shafiei *et al.* 2012 et 2014), ce qui nécessite des études complémentaires, si
20 possible par au moins une autre équipe, pour valider ces résultats.

Tableau 31 : synthèse des études cliniques portant sur l'activité cérébrale

Étude	Type d'étude	population étudiée et nombre de sujets	Effets étudiés-Méthodes	Résultats	Conclusion des auteurs
Robertson <i>et al.</i> , 2010	Provocation analgésie	31 sujets : groupe ELF : 6 femmes/8 hommes, âge $32,2 \pm 2,7$ ans. Groupe exposition factice : 9 femmes/8 hommes, âge $27,6 \pm 1,5$ ans.	Analgésie induite par les champs magnétiques pulsés basses fréquences (PELF). Etude IRMf utilisant le champ magnétique pulsé de l'IRM (0,4 T/sec, exposition 200 μ T) Effets sur nociception chez volontaires sains (douleur thermique cutanée aiguë, 10 sessions de 21 sec « on », 24 sec « off »). Score de douleur sur échelle verbale de 1 à 10.	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de l'activation dans les structures associées avec la composante affective de la douleur : cortex cingulaire antérieur, insula, l'hippocampe et noyaux caudé chez sujets exposés aux PELF pendant 15 min après stimulus douloureux. Pas d'effet des ELF sur la douleur subjective (score verbal) 	L'environnement IRM par ses champs magnétiques pulsés peut induire des phénomènes de neuromodulation (baisse de l'activité cérébrale en réponse à la douleur).
Carruba <i>et al.</i> , 2010	Provocation Champs électromagnétiques comme stresser biologique	22 sujets, 10 hommes (23-61 ans) et 12 femmes (22 – 58 ans)	Effets basses fréquences (60 Hz, 1 ou 5 μ T) sur potentiels évoqués (EPs) EEG (6 positions : occipital, O1-2, central, C3-4 et pariétal P3-4). Analyse EEG non linéaire.	<ul style="list-style-type: none"> Détection d'EPs chez 91 % des sujets à 5 μT et 73% à 1 μT (localisation O1-2 et P3). Apparition des EPs immédiatement début et fin d'exposition en accord avec un phénomène de transduction sensorielle. EPs ne sont pas détectables avec méthode de « moyennage » des temps, ils ont une origine non linéaire. 	<ul style="list-style-type: none"> Effet robuste (presque tous les sujets ont des EPs avec variation > 30 %) Champs électromagnétiques dans l'environnement détectés <i>via</i> transduction sensorielle <i>cf</i> autres agents stressants (chaleur, bruit, lumière...) en accord avec la théorie du stress (<i>stressor theory</i>) – Phénomène biologique avec pas d'indication de causalité avec la pathologie.

Tableau 32 : synthèse des études cliniques portant sur le *neurofeedback*

Étude	Type d'étude	population étudiée et nombre de sujets	Effets étudiés-Méthodes	Résultats	Conclusion des auteurs
Shafiei <i>et al.</i> , 2012	Provocation	19 étudiants hommes (25,6 ± 1,6 ans) droitiers	<p>Étude de l'effet de résonance (altération de la puissance de l'EEG à la fréquence de stimulation).</p> <ul style="list-style-type: none"> Champs BF (exposition locale, 1 point) à 100 µT et fréquences (3, 5, 10, 17, 45 Hz) sur EEG (5 points possibles, central Cz, frontal F3 et F4 et temporal T3 et T4) yeux fermés ou ouverts 2 sessions 120 min avec 2 x 2 min ELF ou exposition factice. Analyse EEG classique (FFFT) 	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'effet de résonance pas d'effet sur l'EEG 10 min après l'exposition souvent pas d'effet des ELF au point exposé. Effets à distance du point exposé sur tous les types d'ondes cérébrales (alpha, bêta, thêta, gamma et delta) fonction de la localisation, de la fréquence et du point exposé. 	Besoin d'expériences supplémentaires avec intensités < ou > 100 µT pour proposer des protocoles d'exposition et un outil en psychologie visant à traiter divers symptômes (<i>cf Neurofeedback</i>).
Zandi Mehran <i>et al.</i> , 2013	Provocation (<i>Neurofeedback</i>)	22 volontaires droitiers (4 femmes, 18 hommes (25,11 ± 3,57 ans) QI > 105	<ul style="list-style-type: none"> Effets de la combinaison <i>Neurofeedback</i> (NF, jeu vidéo) et ELF (45 Hz, 360 µT) en position frontale (F3) sur l'attention et l'EEG (ondes bêta et thêta en position centrale, Cz). Études du rapport thêta/bêta. <p>10 sessions de 10 min avec 16 sujets exposés et 8 sujets non exposés (exposition factice) Analyse EEG Wavelet Packet (WP)?</p>	<p>1- Chez les non exposés : la baisse du rapport thêta/bêta s'accompagne d'une amélioration des performances attentionnelles (précision) pendant le NF vs avant et après.</p> <p>2- Chez les exposés : la combinaison NF + BF diminue significativement le rapport thêta/bêta et améliore l'attention vs NF seul.</p>	<p>Test d'un nouveau système combinant le NF et les champs BF en local : « <i>Neuro-ELF system</i> »</p> <p>Diminution du rapport thêta/bêta qui est inversement corrélé à l'amélioration des performances cognitives</p>

Étude	Type d'étude	population étudiée et nombre de sujets	Effets étudiés-Méthodes	Résultats	Conclusion des auteurs
Zandi Mehran <i>et al.</i> , 2015	Provocation (<i>Neurofeedback</i>)	24 volontaires (6 femmes, 18 hommes (23,5± 2,06 ans))	<ul style="list-style-type: none"> • Effets de la combinaison <i>Neurofeedback</i> (NF, jeu vidéo, 10 min exposition factice et 6 min BF, 10 sessions) et BF (45 Hz, 360 µT, 4 min, 2 sec « on », 3 sec « off ») en position centrale Cz sur l'attention et l'EEG • Études du rapport thêta/bêta (but : ↑ondes bêta et ↓ thêta/bêta en position centrale, Cz). • 10 sessions de 10 min avec 16 sujets exposés et 8 Sham Analyse EEG classique (FFT) Idem Mehran <i>et al.</i> 2013 sauf exposition BF en Cz au lieu de F3	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du thêta/bêta pendant NF dans 2 groupes non exposé et BF vs avant et après • Effet plus marqué dans groupe BF vs non exposé Performance attentionnelles non précisées.	Les 2 méthodes NF seul et NF-BF sont efficaces pour baisser le thêta/bêta en Cz mais la combinaison NE-BF est plus efficace que le NF seul.
Shafiei <i>et al.</i> , 2014	Provocation (<i>neurofeedback</i>)	20 étudiants hommes (23,5 ± 2,5 ans) droitiers	Effets des champs BF (exposition locale, 5 points simultanés), intensités 100, 240, 360 µT, fréquences 3, 5, 10, 17 ou 45 Hz sur EEG (5 points, central, frontal et pariétal) yeux fermés/yeux ouverts <ul style="list-style-type: none"> • 4 sessions 120 min avec 4x2 min BF ou non exposé (exposition factice). • Analyse EEG classique (FFT) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'effets de résonance. • Globalement baisse de puissance des ondes alpha et bêta (toutes intensités et positions) et augmentation des ondes lentes delta et thêta. Pas d'effet sur les ondes gamma. • La variation de la puissance des ondes cérébrale est moindre à 360 µT qu'aux autres intensités. 	Possibilité de protocoles avec champs BF à différentes fréquences/intensités pour changer localement (points précis du cerveau) la puissance spectrale des ondes cérébrales (cf technique du <i>neurofeedback</i>)

Étude	Type d'étude	population étudiée et nombre de sujets	Effets étudiés-Méthodes	Résultats	Conclusion des auteurs
Amirifalah <i>et al.</i> , 2013	Provocation	10 femmes étudiantes et droitières (22-30 ans)	<ul style="list-style-type: none">• Effets des champs BF (200 μT, 10, 14 ou 18 Hz) sur région centrale (C3+C4) sur ondes bêta, delta et SMR en position C3, C4 et Cz-• Une session d'exposition factice et une session ELF, en aveugle, 65 min chacune, 3 min/fréquence d'exposition ELF.• Analyse EEG classique (FFTT)• Etude de l'effet de résonnance.	<ul style="list-style-type: none">- Pas d'effets de résonnance- Globalement, baisse de la puissance absolue ondes bêta, thêta et SMR après les ELF pulsés des régions centrales avec quelques variantes en fonction de la fréquence	Intérêt des ELF dans les approches thérapeutiques type neurofeedback, ex : Low energy neurofeedback system (LENS)

7.2.3 Études sur les tâches cognitives et le comportement

7.2.3.1 Études en relation avec la mémoire, l'apprentissage et la plasticité cérébrale sous-jacente

Tehrani pour *et al.* ont recherché d'éventuels effets d'un champ électromagnétique basses fréquences sur la mémoire spatiale chez la souris (Tehrani pour *et al.*, 2010). Trente souris mâles ont été réparties en trois groupes, un groupe d'exposition factice et deux groupes exposés à un champ de 10 Hz ou 30 Hz (4 μ T), 20 min/jour pendant 5 jours. L'exposition a été effectuée dans un appareil développé par les auteurs. À la fin de chaque exposition, les animaux ont été placés dans la piscine de Morris pour un test de reconnaissance de la plateforme avec une phase d'habituation et une phase de test à 24 h. Ce protocole inédit d'étude de la mémoire spatiale et/ou de la reconnaissance d'objet est mal décrit, sans aucune référence de protocole validé et ne permet pas de prendre en considération les résultats de l'étude.

Cui *et al.* (2012) ont examiné les effets de l'exposition aux champs basses fréquences d'une part sur l'apprentissage et la mémoire chez la souris, et d'autre part sur le statut oxydant dans l'hippocampe et le striatum (*cf.* 7.1.3.2). Trois groupes de 24 souris C57BL/6 mâles ont été utilisés. Le premier groupe a reçu une exposition factice (*sham*), tandis que les 2 autres ont été exposés à un champ de 100 μ T ou de 1 mT (50 Hz), 4 h / jour pendant 12 semaines. Les effets moteurs (ataxie) et sur la locomotion ont été évalués dans un champ ouvert (*open field*) et n'ont montré aucun effet des champs, quelle que soit la densité d'induction magnétique. Les effets sur l'apprentissage et la mémoire ont été évalués à l'aide de 2 protocoles d'apprentissage sur 4 jours consécutifs dans la piscine de Morris : le 1^{er} protocole pour évaluer la mémoire spatiale de référence (dépendante de l'hippocampe) et le 2^e protocole utilisant une plateforme indicée (rendue visible) qui changeait de position chaque jour (version « *cued* », dépendante du striatum, mémoire procédurale). Les auteurs ont constaté que l'exposition à 1 mT provoquait un retard d'apprentissage dans la version mémoire de référence hippocampo-dépendante (augmentation des temps de latence pour atteindre la plateforme par rapport aux 2 autres groupes, *sham* et 100 μ T), et un déficit dans la version indicée (mémoire procédurale) qui semble beaucoup moins marqué. Cependant, les souris du groupe 1 mT présentent un apprentissage dans les deux protocoles (diminution des latences au cours des jours). Un test de rappel n'ayant pas été effectué, on ne peut pas conclure sur la capacité à rappeler un souvenir spatial. Ces altérations du comportement sont associées à des modifications significatives de certains marqueurs du stress oxydant dans les deux structures cérébrales (*cf.* 7.1.3.2). Ainsi, l'exposition à 1 mT (mais pas à 100 μ T) entraîne chez les animaux un retard et/ou une diminution des capacités d'apprentissage dans des tâches liées à l'hippocampe ou au striatum

L'étude de Sakhnini avait pour objectif de mesurer les effets à long terme chez l'animal adulte d'une exposition prénatale ou néonatale aux champs basses fréquences (50 Hz, 1 mT) sur l'apprentissage d'une mémoire spatiale chez la souris BALB/c (Sakhnini *et al.* 2013). Trois groupes d'exposition ont été constitués avec 2 femelles gestantes par groupe : le groupe 1 dont l'exposition débute le jour de la naissance des petits, le groupe 2 dont l'exposition est mise en place les 7 derniers jours de la gestation, et le groupe d'exposition factice. À l'âge de 12 – 13 semaines, le test de la piscine de Morris a été réalisé (5 essais par jour pendant 5 jours consécutifs) pour évaluer les capacités d'apprentissage des souris exposées avant ou après la naissance (proportion de mâles et femelles non précisé). Les résultats montrent qu'à partir du deuxième jour, les souris exposées au champ magnétique aux stades prénatal ou néonatal présentent une augmentation de la distance et de la latence pour atteindre la plateforme, mais pour le groupe 1 (exposition néonatale), on observe ensuite une baisse progressive avec le temps, attestant d'un apprentissage. Par contre, les souris du groupe 2 (exposition prénatale) ne présentent pas une courbe d'apprentissage classique, ce qui pourrait attester d'un déficit d'apprentissage. De manière surprenante, au jour 1, c'est l'inverse, les souris exposées (en période pré- et post-natale) présentent une baisse de ces 2 paramètres (soit de meilleures performances) par rapport aux souris *sham*. L'absence de test de rappel pour évaluer la mémoire de la localisation de la plateforme, ainsi que le mélange mâles-femelles rend difficile l'interprétation de ces données. En conclusion, ces résultats montrent qu'une exposition pré ou post-natale aux champs basses

fréquences provoque un déficit à long terme dans les capacités d'apprentissage chez la souris, qui nécessite cependant d'être confirmé avec des conditions expérimentales plus rigoureuses.

Li, Zhang et Song ont exposé des rats mâles Sprague Dawley âgés de 10 semaines à un champ électromagnétique basse fréquence (50 Hz, 100 μ T) de façon continue pendant 90 jours afin d'évaluer les effets sur l'apprentissage et la mémoire spatiale en piscine de Morris, (Li *et al.*, 2014a). Ces auteurs ont également évalué l'effet d'un pré-apprentissage (identique à celui après l'exposition aux champs dans le même test) appelé « entraînement » avant l'exposition au champ (un effet bénéfique d'une telle expérience préalable sur les performances de mémoire testées ultérieurement a été démontré dans la littérature chez des rats témoins). Ainsi, les rats sont divisés en 4 groupes : groupe contrôle sans entraînement préalable, groupe exposé sans entraînement préalable, groupe contrôle avec entraînement préalable, groupe exposé avec entraînement préalable. À la fin de l'exposition, tous les rats font le test en piscine de Morris (5 jours d'apprentissage et test de rappel à 24 h). Cette étude met en évidence une amélioration des performances d'apprentissage et de mémoire chez les rats ayant eu un entraînement préalable, qu'ils aient été exposés ou non. Aucune différence n'est observée entre les rats exposés et les rats contrôles, qu'ils aient subi un entraînement avant l'exposition ou non.

Dans le cadre d'une série d'études sur la neurogénèse, Leone *et al.* (2014) ont recherché si l'augmentation de la neurogénèse induite par l'exposition à des champs basses fréquences a un effet bénéfique sur les capacités de mémoire (spatiale et reconnaissance d'objets) chez la souris et, le cas échéant, quels sont les mécanismes impliqués (*cf.* paragraphe 7.2.4). Trente-huit souris mâles (C57bl/6) âgées de 4 - 5 semaines ont été réparties en 2 groupes : un groupe d'exposition factice et un groupe exposé à un champ basse fréquence (50 Hz, 1 mT, 3,5 h / jour pendant 12 jours). Deux tests comportementaux ont été réalisés : la piscine de Morris pour la mémoire spatiale et la reconnaissance d'objets. L'exposition des animaux aux champs améliore leur performance de mémoire. En effet, dans le test de la piscine de Morris (mémoire spatiale), les animaux exposés mettent significativement moins de temps à trouver la plateforme immergée lors de l'apprentissage et passent significativement plus de temps dans le quadrant virtuel de la piscine qui contenait la plateforme (quadrant cible) au rappel testé à 24 h, par rapport aux souris contrôles. Il est à noter que les souris contrôles ne présentent pas de rappel (performances au hasard, pas de préférence pour le quadrant cible), et qu'il eut été souhaitable de montrer que si les souris exposées présentent bien de meilleures performances que les contrôles, leurs performances ne relèvent pas du hasard (comparaison du temps passé dans le quadrant cible *versus* le hasard soit 25 % du temps dans le quadrant cible ou 15 sec). En effet, cette comparaison statistique est le critère habituellement admis pour attester du rappel du souvenir de la localisation de la plateforme. Cette étude statistique n'ayant pas été réalisée, il subsiste un doute, même si au vu des données et du nombre de souris par groupe (n = 14 témoins et n = 16 exposées), il est probable que les souris exposées présentent bien un rappel, mais pas forcément les souris témoins. Pour le test de reconnaissance d'objets, les souris exposées aux champs sont davantage capables de discriminer le nouvel objet (test de reconnaissance d'objet).

Li *et al.* (2014b) ont recherché les modifications cellulaires dans des structures cérébrales impliquées dans les processus d'apprentissage et de mémoire. Ils ont investigué les effets d'une exposition aux champs basses fréquences (50 Hz, 0,5 mT, 4 h / jour pendant 14 ou 28 jours) sur l'expression des sous-unités des récepteurs AMPAR et NMDAR dans des structures cérébrales importantes pour la mémoire, *i.e.*, l'hippocampe et les cortex préfrontal et entorhinal. L'expression des sous-unités GluA1, GluA2 et GluA3 du récepteurs AMPA et, GluN1, GluN2A et GluN2B du récepteur NMDA a été mesurée en *western-blot*. Un test de mémoire et d'apprentissage complète l'étude dans la piscine de Morris où sont évaluées la vitesse de nage (fonctions motrices) et la latence pour rejoindre la plateforme immergée (apprentissage spatial). Ces expériences ont été menées sur des rats adultes mâles Sprague Dawley. Soixante animaux ont été répartis en 4 groupes : deux groupes expérimentaux exposés aux champs pendant 14 ou 28 jours et les deux groupes témoins correspondant. Les résultats montrent que les champs basses fréquences n'affectent pas les performances d'apprentissage et de mémoire spatiale mais affectent l'expression de ces sous-unités de manière différente en fonction du type de sous-unités et de la structure cérébrale. Ainsi, pour le récepteur AMPA, une baisse de GluA2 est observée après 28

jours d'exposition dans le cortex entorhinal, et une augmentation de GluA3 après 14 jours d'exposition dans le cortex préfrontal. De manière surprenante, aucune modification des sous-unités AMPA n'a été observée dans l'hippocampe. Pour le récepteur NMDA, une augmentation de GluN1 et GluN2A est observée après 14 jours d'exposition aux champs dans les cortex entorhinal et préfrontal, qui persiste à 28 jours pour GluN1 dans le cortex préfrontal, alors qu'une baisse de GluN2A est observée à 28 jours dans le cortex entorhinal. Dans l'hippocampe, l'augmentation de GluN2A et GluN2B après 14 jours d'exposition, persiste à 28 jours seulement pour GluN2B. Ces résultats indiquent des modifications de l'expression de ces récepteurs ionotropiques au glutamate induites par l'exposition aux champs qui dépendent de la durée d'exposition, mais aussi du sous-type de récepteurs et de la structure cérébrale. Cependant, ces modifications sont insuffisantes pour affecter les capacités de mémoire spatiale des animaux.

En 2013 et 2015, Zhang *et al.* ont publié deux études, la première sur les effets d'une exposition chronique (12 semaines) concomitante aux champs électromagnétiques basses fréquences et à l'aluminium, et la seconde sur les effets des champs seuls sur la genèse de troubles cognitifs histopathologiques en lien avec ceux observés dans la maladie d'Alzheimer. Pour cela, ils ont utilisé une approche comportementale en piscine de Morris pour l'étude de la mémoire spatiale et des mesures histopathologiques pour la morphologie et les concentrations en peptides β amyloïdes sur des rats mâles Sprague-Dawley sains (*cf.* 7.2.1.1, Zhang *et al.*, 2013, 2015). Les rats ont été exposés en continu soit à un champ d'intensité 100 μ T (50 Hz), soit à une exposition factice (*sham*) pendant 12 semaines. Dans les 2 études, l'apprentissage dans la piscine de Morris a été évalué sur 5 jours consécutifs sans test de rappel. Les résultats ne montrent aucun effet de l'exposition aux champs seuls sur la latence et la distance pour rejoindre la plateforme immergée, attestant de l'absence d'effet d'une telle exposition

7.2.3.2 Effets des ondes sur le comportement (anxiété, locomotion, interactions sociales, agressivité).

Balassa *et al.* ont recherché, sur un modèle animal, les effets d'une exposition aiguë aux champs basses fréquences sur le comportement des animaux, pour explorer les effets et symptômes non spécifiques attribués aux ondes (maux de tête, douleurs, inconfort...) (Balassa *et al.*, 2009). Quatre-vingt rats adultes mâles Sprague Dawley et Wistar ont été exposés 20 min à un champ électromagnétique à 50 Hz (500 μ T) à l'aide d'un appareil développé par les auteurs. L'appareil est bien décrit et l'exposition a été caractérisée. Juste après l'exposition, les animaux ont été soumis à différents tests visant à estimer leur anxiété, leurs interactions sociales, leur activité exploratoire et leur territorialité. L'anxiété a été estimée dans un labyrinthe en croix surélevé ; l'activité exploratoire, suite à l'introduction d'un objet nouveau dans la cage d'élevage ; les interactions sociales, par l'observation du comportement des animaux suite à la rencontre avec un nouvel individu dans un nouvel environnement ; et la territorialité a été évaluée en déplaçant l'animal (qui devient un intrus) dans la cage d'un autre rat résident. Tous les tests ont été enregistrés sur vidéo pour une analyse fine du comportement *a posteriori*. Les résultats montrent que l'exposition aux champs (20 min, 50 Hz, 500 μ T) influence le comportement général du rat, les rendant plus passifs. En effet, les rats présentent une activité locomotrice et exploratoire moindre. En revanche, ni les interactions sociales, ni le comportement territorial n'ont changé suite à l'exposition à des champs basses fréquences. Les auteurs cherchent à analyser les interactions entre anxiété sociale et anxiété situationnelle et sont très prudents quant à leurs résultats qui présentent régulièrement des variances élevées. Ils concluent que l'exposition entraîne une passivité courte mais bien détectable. Ils indiquent également que d'autres études permettant de mieux délimiter ces aspects seraient nécessaires.

L'étude de Szemerszky *et al.*, (Szemerszky *et al.* 2010) avait pour but de rechercher les effets d'une exposition à un champ électromagnétique basse fréquence (50 Hz, 0,5 mT) sur l'anxiété et le comportement de type dépressif, en lien avec un état anxieux chronique chez le rat Sprague-Dawley. Deux conditions d'exposition ont été utilisées. Le premier groupe de rats, constitué d'animaux jeunes, a été exposé de façon continue pendant 4 à 6 semaines. Le second groupe, constitué d'animaux plus âgés, a été exposé 8 h par jour pendant 5 jours consécutifs. Pour chaque condition d'exposition, un groupe d'exposition factice a été réalisé. L'exposition est

assurée par un appareil développé par les auteurs dont les caractéristiques sont bien décrites. L'anxiété a été évaluée par le test du labyrinthe en croix surélevé, et le comportement de type dépressif par le test de nage forcée⁶⁸. Afin d'estimer les modifications chroniques relatives au stress, l'animal, puis la glande surrénale et le thymus ont été prélevés et pesés, et les niveaux sanguins d'ACTH et de corticostérone ont été mesurés. Le niveau d'ARNm codant pour la POMC (proopiomélanocortine), le précurseur de l'ACTH, a été évalué dans l'hypophyse. Les deux conditions d'exposition sont sans effet sur les paramètres associés au stress chronique (réduction du poids corporel, involution du thymus et hypertrophie de la glande surrénale). L'exposition pendant 5 jours est sans effet sur l'ensemble des paramètres mesurés dans cette étude. En revanche, l'exposition continue pendant 4 à 6 semaines entraîne une augmentation de la glycémie ainsi qu'une augmentation significative du POMC, associées à une augmentation d'un des deux paramètres dans le test de la nage forcée, mais les paramètres évaluant l'anxiété ne sont pas affectés. En conclusion, en utilisant des approches classiques, les auteurs observent peu d'altérations dans le comportement d'animaux exposés à des champs basses fréquences. Au final, il ressort de cette étude plutôt bien menée qu'une exposition continue affecte peu les différents paramètres comportementaux investigués en lien avec un stress chronique pouvant engendrer un état dépressif, malgré une augmentation de la glycémie et du précurseur d'une hormone liée au stress (POMC) dans l'hypophyse.

Le but de l'étude de Shin *et al.* était d'évaluer si l'exposition aux champs basses fréquences peut modifier l'activité locomotrice des animaux et dans quelle mesure cet effet implique les voies dopaminergiques (Shin *et al.*, 2011). Dans une précédente étude, les auteurs avaient montré que l'exposition aux champs augmente l'activité locomotrice *via* la stimulation du récepteur dopaminergique D1 (Shin *et al.*, 2007). Dans l'étude de 2011, les auteurs ont voulu rechercher si le facteur de transcription FRA (facteur 35-kDa *fos-related antigen*, faisant partie du complexe AP-1), facteur régulant l'expression de gènes associés à l'adaptation neuronale, est également impliqué lors d'une exposition chronique aux champs. Des souris mâles C57BL/6 ont été exposées à un champ magnétique d'intensité 0,3 ou 2,4 mT (60 Hz) 1 h / jour pendant 14 jours consécutifs. Trente minutes après l'exposition, les souris ont été traitées avec un antagoniste du récepteur D1 (SCH23390) ou du récepteur D2 (sulpiride) à la dopamine. L'activité locomotrice (sur une période de 30 minutes) a été mesurée immédiatement, 1 jour, 1 semaine, 3 mois et 1 an après la fin de l'exposition. L'immunoréactivité de FRA a été recherchée dans le complexe striatal (striatum et noyau accumbens). Les animaux ont été mis à mort pour l'analyse immunohistochimique 90 minutes après mesure de l'activité locomotrice. L'activité locomotrice et l'immunoréactivité de FRA dans le complexe striatal sont significativement augmentées immédiatement après l'exposition aux champs, la réponse étant fonction de l'intensité du champ. De manière inattendue, l'immunoréactivité de FRA induite par l'exposition perdure pendant au moins un an, alors que l'activité locomotrice retrouve des valeurs basales 3 mois après la fin de l'exposition. L'hyperactivité locomotrice induite par l'exposition aux champs est significativement atténuée par un traitement avec l'antagoniste du récepteur dopaminergique D1, mais pas par celui du récepteur dopaminergique D2. L'ensemble de ces données suggère donc que l'exposition aux champs basses fréquences provoque une augmentation de l'activité locomotrice et une expression à très long terme de FRA dans le complexe striatal impliquant les récepteurs dopaminergiques D1.

L'objectif de l'étude publiée par Janać en 2012 était d'identifier d'éventuels troubles du comportement d'animaux exposés à des champs basses fréquences (Janać *et al.*, 2012). Soixante-dix gerbilles mâles âgées de 3 ou 10 mois ont été exposées à un champ d'intensité nulle (groupe témoin) - 0,1 - 0,25 ou 0,5 mT pendant 7 jours. Un groupe contrôle-cage a également été réalisé. Le système d'exposition, développé par les auteurs, est insuffisamment

⁶⁸ Le test de nage forcée est un test servant à mesurer l'état dépressif chez l'animal. Il consiste à placer un animal dans un aquarium rempli d'eau duquel il ne peut s'échapper. Des paramètres de mobilité liés à la volonté de s'échapper sont mesurés (Cam *et al.*, 2012).

décrit, et les tailles des cages des animaux mentionnées laissent suspecter une inhomogénéité du champ. Le comportement des gerbilles a été évalué dans un champ ouvert (vitesse, distance, stéréotypies, immobilité) pendant 60 min (2 x 30 min), au 1^{er}, 2^{ème}, 4^{ème} et 7^{ème} jour d'exposition et 3 jours après la fin de l'exposition afin de mettre en évidence les effets « retards ». Il est à noter que les auteurs utilisent une définition des stéréotypies étonnante (distance totale que la tête de l'animal a effectuée pendant le test !) sans donner aucune référence dans la littérature. Les auteurs ont trouvé des différences significatives entre le groupe d'exposition factice et les groupes exposés pour les 2 périodes de 30 min du test, quels que soient l'âge des animaux et le niveau de champ appliqué. Chez les gerbilles âgées de 3 mois, l'exposition à des champs électromagnétiques de 0,1, 0,25 et 0,5 mT provoque une augmentation de l'activité locomotrice avec, par voie de conséquence, une diminution du temps d'immobilité. L'exposition aux champs (excepté à 0,25 mT) a un effet « retard » sur les stéréotypies et l'immobilité. Chez les gerbilles de 10 mois, les expositions aux champs de 0,1, 0,25 et 0,5 mT induisent respectivement une diminution, une légère augmentation et une stimulation prononcée du comportement moteur. Par ailleurs, chez ces animaux, et indépendamment de la valeur de l'induction magnétique, les auteurs ont observé une augmentation de l'activité locomotrice 3 jours après l'arrêt de l'exposition (effet retardé). Au vu des faiblesses de l'étude (système d'exposition, évaluation comportementale des stéréotypies, ces résultats méritent d'être confirmés et complétés par des expérimentations permettant d'estimer notamment le stress émotionnel des animaux et leur capacité d'apprentissage.

En 2014, Salunke *et al.* se sont intéressés à l'effet d'une exposition aux champs basses fréquences sur le comportement anxieux de la souris, associé à des altérations cérébrales neurochimiques (Salunke *et al.*, 2014a). Des souris mâles Swiss ont été exposées à 1 mT (50 Hz) 8 h / jour pendant 7, 30, 60, 90 ou 120 jours (6 à 8 animaux par groupe). Le niveau d'anxiété a été évalué par des tests comportementaux : test du labyrinthe en croix surélevé, *open-field* ou champ ouvert, et par un test d'interactions sociales juste après la fin de l'exposition. Par ailleurs, le rôle du GABA et du glutamate dans l'anxiété induite par les champs a été évalué en traitant des souris avec des agents agonistes ou antagonistes des récepteurs au GABA-A (respectivement muscimol et bicuculline) et au glutamate (respectivement NMDA et MK-801) de façon concomitante à l'exposition. Si l'exposition aux champs seuls pendant une semaine n'affecte pas l'anxiété des animaux, après 30 jours les auteurs rapportent un comportement anxieux évident, qui s'amplifie encore après 60 jours et perdure ensuite. L'administration de NMDA aggrave l'anxiété induite par l'exposition aux champs, alors que l'administration de MK-801 la réduit. En revanche, l'anxiété n'est pas modulée par l'administration d'agoniste ou d'antagoniste du récepteur au GABA-A. Par ailleurs, une augmentation significative des taux de GABA et de glutamate dans l'hippocampe et l'hypothalamus a été constatée. Les auteurs concluent que l'exposition aux champs basses fréquences peut induire un comportement anxieux chez la souris, et ils suggèrent l'implication du récepteur au NMDA et non celle de la transmission GABA-A.

La même équipe a réalisé une étude pour déterminer l'implication de la dopamine, de la sérotonine et de l'oxyde nitrique (NO) dans un comportement de type « trouble obsessionnel compulsif » (TOC) en lien avec l'anxiété, induite par l'exposition aux champs basses fréquences (Salunke *et al.*, 2014b). Les auteurs ont utilisé le même protocole que précédemment (Salunke *et al.*, 2014a). Pour évaluer l'anxiété des souris, le test d'enfouissement des billes⁶⁹ a été utilisé. Les résultats montrent que l'exposition au champ entraîne une augmentation du comportement de type TOC chez la souris, qui s'amplifie avec la durée de l'exposition. Les niveaux de dopamine, sérotonine et NO ont été déterminés dans différentes régions cérébrales. Une

⁶⁹ Le test d'enfouissement des billes repose sur le fait que l'anxiété chez le rat déclenche le réflexe d'enfouissement. La présence de billes dans la cage de l'animal est un facteur anxiogène, qui aura tendance à les enfouir dans la sciure. Plus un rat possède un comportement de type anxieux, plus le nombre de billes enfouies à la fin de la période d'observation sera grand.

augmentation des niveaux de NO a été retrouvée dans le cortex, l'hippocampe et l'hypothalamus, alors que les niveaux de dopamine et de sérotonine ont été inchangés. Enfin, des modulateurs du NO (précurseur : L-ARG ou inhibiteur L-NAME, ou 7-NI) ont été administrés de façon concomitante à l'exposition aux champs. L'administration de précurseurs de NO amplifie le comportement de type TOC, alors que les inhibiteurs de NO l'atténuent. Les auteurs proposent une piste thérapeutique possible avec les inhibiteurs de NO pour atténuer les effets comportementaux des champs basses fréquences.

Le but de l'étude de Rauš Balind *et al.* (même groupe que Janač et Rauš, *cf.* 7.1.3.2 et 7.2.1.2) était de déterminer les conséquences d'une exposition aux champs basses fréquences à court-terme et à long-terme sur la sécrétion d'ACTH par l'hypophyse, un marqueur de l'activation de l'axe hypothalamo-hypophysio-surrénalien commandant la réponse neuroendocrine au stress (Rauš Balind *et al.*, 2014b). Deux séries d'expériences ont été réalisées. Dans la première, des rats Wistar âgés de 3 mois ont été exposés pendant une courte période de temps (1 ou 7 jours) à un champ magnétique (50 Hz, 0,5 mT). Dans la seconde, un rat mâle et plusieurs femelles ont été exposés, l'exposition a duré lors de l'accouplement, puis toute la période de la gestation, et jusqu'au 3^{ème} mois de la progéniture. Quelle que soit la durée de l'exposition, les animaux ont été mis à mort immédiatement après la fin de l'exposition et l'hypophyse a été prélevée pour analyse. Des approches histologiques classiques avec quantification en stéréologie ont été mises en œuvre : volume de l'hypophyse, nombre de cellules sécrétant de l'ACTH, volume des cellules à ACTH et de leur noyau. Les auteurs rapportent que l'exposition pendant 1 jour entraîne une diminution de 25 % environ du nombre et du volume des cellules sécrétant l'ACTH. Ils observent également une diminution d'un tiers de la taille de l'hypophyse. L'exposition pendant 7 jours entraîne seulement une réduction du volume des cellules à ACTH, les autres paramètres sont normaux. L'exposition chronique induit également une diminution du volume des cellules à ACTH et du volume de l'hypophyse. Les auteurs concluent que l'exposition aux champs basses fréquences a un effet sur les paramètres morphologiques des cellules hypophysaires et peut être considérée comme un agent stressant.

Hori *et al.* (2015) ont recherché les effets d'un champ électrique basse fréquence sur l'anxiété de la souris, par dosage des glucocorticoïdes plasmatiques. Trois manipulations ont été réalisées. La première consistait à voir si l'exposition aux champs seuls, c'est-à-dire sans contention, avait un effet sur le niveau plasmatique en glucocorticoïdes. Des souris mâles Balb/c ont été exposées à un champ électrique (50 Hz, intensité 0, 10 kV/m, ou 150 kV/m) pendant 60 min. La seconde consistait à déterminer si l'intensité des champs influait sur le niveau plasmatique en glucocorticoïdes. Pour cela, les souris ont été exposées à un champ électrique (50 Hz, intensité 0, 2,5 kV/m, 5 kV/m, 10 kV/m, 50 kV/m ou 200 kV/m) pendant 60 min, alors qu'elles étaient immobilisées lors des 30 dernières minutes d'exposition. Enfin, la troisième manipulation consistait à vérifier si la durée d'exposition au champ électrique avait un effet sur la concentration plasmatique de glucocorticoïdes. Les souris ont été exposées à un champ électrique (50 Hz, 10 kV/m) pendant 6, 20 ou 60 minutes. Les souris ont subi une contention pendant 30 minutes après la 3^{ème}, 10^{ème} ou 30^{ème} minute d'exposition. À la fin de chaque manipulation, des échantillons de plasma ont été prélevés, et les niveaux de glucocorticoïdes ont été estimés. Les résultats montrent que l'exposition au champ électrique seul n'induit pas d'augmentation du niveau de glucocorticoïdes, contrairement à la contention. Chez les animaux exposés et immobilisés, une diminution de la concentration de glucocorticoïdes intensité-dépendante est constatée entre 0 et 10 kV/m, puis une augmentation entre 50 et 200 kV/m. Enfin, plus la durée de l'exposition au champ électrique est longue, plus la concentration plasmatique en glucocorticoïde est basse. Les auteurs concluent que le champ électrique basse fréquence altère la réponse au stress d'une manière dépendante de l'intensité et de la durée. Les effets anti-stress ou suppresseur de la sécrétion de glucocorticoïdes se produisent à des intensités < 50 kV/m ; cependant, à partir de 50 kV/m, un effet possible des vibrations du système d'exposition est évoqué par les auteurs.

7.2.3.3 Conclusion

Les études relatives à l'effet de l'exposition aux champs basses fréquences sur la mémoire sont de qualité inégale, et leurs résultats très disparates. Certaines décrivent une amélioration des performances de l'animal, alors que d'autres montrent un effet néfaste, quand d'autres ne trouvent aucune différence significative entre les groupes d'animaux testés.

Plusieurs publications suggèrent que les champs basses fréquences peuvent interagir avec le comportement des animaux, Plusieurs équipes décrivent un effet de l'exposition sur la locomotion, l'anxiété ou le stress émotionnel des animaux modèles, mais dans la plupart des cas, avec des expositions de fortes intensités (500 μ T dans la majorité des cas) et ont obtenus des résultats variables. Il est d'ailleurs possible que ces effets apparaissent de façon dépendante de l'intensité du champ et de la durée de l'exposition (Hori *et al.*, 2015). Quelques hypothèses mécanistiques (implication de la voie POMC-ACTH-gluocorticoïdes, ou des récepteurs au NMDA, ou des récepteurs dopaminergiques D1) ont été proposées, qui restent à confirmer. Enfin, une étude confirme des données plus anciennes sur l'effet potentiellement antalgique des champs basses fréquences à des intensités faibles (< 1 μ T).

Tableau 33 : synthèse des études en relation avec les tâches cognitives et le comportement

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux par groupe	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Cui <i>et al.</i> , 2012	100 μ T ou de 1 mT (50 Hz), 4 h / jour pendant 12 semaines	Souris C57BL/6 mâles	Effets moteurs et sur la locomotion Apprentissage et mémoire (mémoire spatiale de référence dépendante de l'hippocampe et mémoire procédurale dépendante du striatum)	24	Inchangé retard d'apprentissage dans la version mémoire de référence hippocampo- dépendante déficit dans la mémoire procédurale moins marqué
Sakhnini <i>et al.</i> 2013	50 Hz, 1 mT, pendant 7 jours, débutant soit 7 jours avant la fin de la gestation (exposition <i>in utero</i>), soit le jour de la naissance (exposition néonatale)	Souris BalbC	Apprentissage et mémoire spatiale	8 pour groupe contrôle 13 – 18 pour groupes exposés	l'exposition pré ou post-natale aux basses fréquences provoque un déficit à long terme dans les capacités d'apprentissage chez la souris
Li <i>et al.</i> , 2014a	50 Hz, 100 μ T de façon continue pendant 90 jours	Rats mâles Sprague Dawley	Apprentissage et mémoire spatiale	10	Inchangé
Leone <i>et al.</i> 2014	50 Hz, 1 mT, 3,5 h / jour pendant 12 jours	Souris C57bl/6 mâles	Mémoire spatiale et reconnaissance d'objets	14 - 20	amélioration de la performance de mémoire augmentation de la capacité à discriminer un objet
Li, <i>et al.</i> 2014b	50 Hz, 0,5 mT, 4 h / jour pendant 14 ou 28 jours	Rats Sprague- Dawley mâles	Apprentissage et mémoire spatiale L'expression des sous-unités des récepteurs AMPAR et NMDAR dans l'hippocampe et les cortex préfrontal et entorhinal	5 - 9	performances d'apprentissage et de mémoire spatiale inchangées modifications de l'expression de ces récepteurs ionotropiques au glutamate, différentes selon la durée d'exposition et la structure cérébrale

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux par groupe	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Zhang <i>et al.</i> 2013	50 Hz ; 100 μ T pendant 12 semaines Administration d'aluminium <i>per os</i>	Rats Sprague- Dawley	Mémoire spatiale (Piscine de Morris) Peptide β -amyloïde	10	Pas de différence entre le groupe Al seul et Al + MF
Zhang <i>et al.</i> 2015	50 Hz ; 100 μ T pendant 12 semaines	Rats Sprague- Dawley	Analyse histopathologique de l'hippocampe CA-1 et du cortex cérébral	10	Pas de différence entre le groupe exposé et non exposé

Tableau 34 : synthèse des études en relation avec le comportement (anxiété, locomotion, interactions sociales, agressivité)

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux par groupe	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
Balassa, 2009	50 Hz ; 500 μ T pendant 20 minutes	Rats adultes mâles Sprague Dawley et Wistar	Anxiété, interaction sociale, activité exploratoire et territorialité	10	diminution de l'activité locomotrice et exploratoire interactions sociales, comportement territorial inchangé
Szemerszky et al. 2010	50 Hz, 0,5 mT exposition : de façon continue pendant 4 à 6 semaines, ou 8 h par jour pendant 5 jours consécutifs	Rat Sprague- Dawley	Anxiété et comportement de type dépressif, en lien avec un état anxieux chronique Recherche de marqueurs de stress dans le cerveau	8	Pas de changement des paramètres explorés pour une exposition de 5 jours. Quelques modifications de certains paramètres évaluant le comportement de type dépressif pour une exposition de 4 à 6 semaines.
Shin <i>et al.</i> , 2011	60 Hz ; 0,3 ou 2,4 mT, 1 h / jour pendant 14 jours consécutifs	Souris mâles C57BL/6	Activité locomotrice (immédiatement, 1 jour, 1 semaine, 3 mois et 1 an après la fin de l'exposition) Voies dopaminergiques impliquées (immunoréactivité du facteur de transcription FRA)	6	Augmentation de l'activité locomotrice (immédiatement et jusqu'à 3 mois après l'exposition) Augmentation de l'immunoréactivité de FRA dans le striatum immédiatement après l'exposition et jusqu'à un an après la fin de l'exposition. Implication possible des voies dopaminergique
Janać <i>et al.</i> 2012	50 Hz ; 0,1 - 0,25 ou 0,5 mT pendant 7 jours	Gerbilles mâles âgées de 3 ou de 10 mois	Comportement en champ ouvert (vitesse, distance, stéréotypies, immobilité) pendant deux sessions de 30 min	5 - 7	Différence dans les stéréotypies quel que soit le groupe d'exposition Augmentation de l'activité locomotrice chez les exposées quel que soit le groupe d'exposition Effet retard des champs pour les stéréotypies et l'immobilité
Salunke <i>et al.</i> 2014a	50 Hz ; 1 mT pendant 7, 30, 60, 90 ou 120 jours	Souris mâles	Anxiété et interactions sociales Rôle du GABA et glutamate	6 - 8	Comportement anxieux croissant après 30 jours d'exposition

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux par groupe	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
		Swiss	dans l'anxiété induite par les champs		Agoniste du glutamate aggrave l'anxiété et son antagoniste la réduit. Pas d'effet d'un agoniste ou d'un antagoniste du GABA Augmentation des taux de GABA et glutamate dans l'hippocampe et l'hypothalamus chez les exposés
Salunke <i>et al.</i> , 2014b			Anxiété – comportement type trouble obsessionnel compulsif (TOC) Rôle de la dopamine, sérotonine et oxyde nitrique (NO)	6 - 8	Comportement type TOC chez les exposés Augmentation du NO dans l'hypothalamus, l'hippocampe et le cortex Précurseur du NO amplifie le comportement type TOC et les inhibiteurs l'atténuent
Rauš Balind <i>et al.</i> , 2014b	<u>Exposition aiguë</u> 50 Hz, 0,5 mT pendant 1 à 7 jours	Rat Wistar de 3 mois	Histologie de l'hypophyse	6 - 8	<u>Après 1 jour d'exposition :</u> Diminution du nombre et du volume des cellules à ACTH Diminution de la taille de l'hypophyse <u>Après 7 jours d'exposition :</u> Diminution du volume des cellules à ACTH
	<u>Exposition chronique</u> 50 Hz, 0,5 mT pendant durée de la gestation jusqu'au 3 ^{ème} mois des petits			6 - 8	Diminution du volume des cellules à ACTH
Hori <i>et al.</i> , 2015a	50 Hz ; 0, 10 kV/m, ou 150 kV/m pendant 60 min	Souris mâles Balb/c	Anxiété : dosage des glucocorticoïdes plasmatiques	5 - 6	Pas d'augmentation des glucocorticoïdes
	50 Hz ; 0, 2,5 kV/m, 5 kV/m, 10 kV/m, 50 kV/m ou 200 kV/m				Diminution de la concentration de glucocorticoïdes intensité-dépendante entre 0

Référence	Exposition Durée d'exposition	Espèce	Effet étudié	Nombre d'animaux par groupe	Conclusion des auteurs (se référer au texte pour les commentaires)
	pendant 60 min dont 30 min de contention				et 10 kV/m Augmentation de la concentration de glucocorticoïdes intensité-dépendante entre 50 et 200 kV/m
	50 Hz ; 10 kV/m pendant 6, 20 ou 60 min, contention de 30 min après la 3 ^{ème} , 10 ^{ème} ou 30 ^{ème} minute d'exposition				Diminution des glucocorticoïdes temps dépendant

7.2.4 Études en relation avec la plasticité cérébrale

La plasticité cérébrale correspond à la capacité du cerveau à modifier l'organisation de ses réseaux de neurones (par exemple, renforcement des synapses existantes et création de nouvelles synapses) en fonction des expériences vécues ou des stimuli. Par extension, cette notion englobe la capacité du cerveau à renouveler ses neurones, en lien avec la neurogenèse adulte dans l'hippocampe. La plasticité neuronale joue un grand rôle dans les phénomènes d'apprentissage et de mémorisation. Elle est également impliquée dans les réponses aux lésions cérébrales, mais aussi, plus généralement, en réponse aux stimulations de l'environnement.

Les travaux de Balassa *et al.* (Balassa *et al.*, 2013) ont recherché les effets d'une exposition aux champs basses fréquences (0,5 et 3 mT, 50 Hz) sur l'excitabilité et la plasticité du cerveau en développement chez le rat Wistar. Les chercheurs ont exposé : i) des rates gestantes à un champ d'intensité 500 μ T, 24 h / 24, durant 7 jours au cours de la 2^e semaine de gestation (lors de laquelle se déroule la neurulation, c'est-à-dire le premier événement de la formation du futur système nerveux), et ii) des nouveau-nés à un champ d'intensité 3 mT, 24 h / 24, durant 7 jours, à partir du 3^e jour postnatal (à partir duquel se déroule la myélinisation des neurones). Les groupes sont composés de 6 à 8 animaux et l'exposition est effectuée dans un appareil développé par les auteurs. Les fonctions synaptiques basales et la plasticité du néocortex (cortex somatosensoriel) et de l'hippocampe ont été évaluées en électrophysiologie sur tranches de tissu cérébral par l'analyse des potentiels évoqués extracellulaires sur des rats âgés de 2 mois. Deux conclusions majeures peuvent être tirées des résultats :

1 – pour les fonctions synaptiques basales : le seuil de stimulation pour générer des potentiels évoqués dans le néocortex est plus faible chez les rats exposés *in utero* que chez les rats contrôles. Par ailleurs, aucun effet des champs n'a été observé ni après l'exposition néonatale dans le néocortex ni dans l'hippocampe pour les deux autres périodes d'exposition (pré- et post-natales). Ainsi, l'exposition aux champs basses fréquences augmente l'excitabilité basale dans le néocortex après exposition *in utero* seulement.

2 – la plasticité synaptique à court (« *paired pulse depression* » ou PPD) et à long-terme (potentialisation à long terme ou LTP) est altérée dans le néocortex lorsque l'exposition aux champs a eu lieu *in utero*, alors que l'exposition chez le nouveau-né est sans effet. Dans l'hippocampe, les modifications ne sont pas significatives, quel que soit le traitement (pré- ou néonatal) et le type de plasticité étudié (court- et long-terme).

Ces résultats suggèrent que l'exposition aux champs *in utero* (et pas en période postnatale) peut avoir des effets sur le développement cérébral des synapses et leur plasticité, qui sont observés plutôt dans le néocortex et peu ou pas dans l'hippocampe.

Le but de l'étude publiée par Komaki en 2014 (Komaki *et al.*, 2014) était d'évaluer les effets d'une exposition à long terme aux champs basses fréquences sur la plasticité synaptique de l'hippocampe *in vivo* chez le rat anesthésié. Vingt-neuf rats mâles Wistar ont été utilisés, 10 rats exposés à un champ (50 Hz, 100 μ T, 2 h / jour pendant 3 mois à heures fixes), 10 rats contrôles-cage et 9 rats subissant une exposition factice. L'exposition est assurée par un appareillage développé par les auteurs (*cf.* Salehi *et al.* 2013). Les études électrophysiologiques ont mesuré divers paramètres de la plasticité synaptique du gyrus denté par stimulation à haute fréquence (étude des synapses de la voie perforante-gyrus denté). Les paramètres ont été la potentialisation à long terme ou LTP, les potentiels de champ post-synaptiques excitateurs (fEPSP), les « *population spikes* » neuronales et le « *paired pulse ratio* » ou PPR des potentiels évoqués). Une exposition chronique aux champs induit une augmentation significative de la LTP dans le gyrus denté de l'hippocampe (augmentation de la pente des fEPSP et de l'amplitude des « *population spikes* »). Les auteurs concluent que l'exposition aux champs augmente la plasticité synaptique chez le rat et suggèrent un site d'expression post-synaptique de cette plasticité dans le gyrus denté (pas d'effet de l'exposition aux champs sur les PPR). Parmi les hypothèses proposées par les auteurs, la possible modulation de la neurogenèse adulte dans le gyrus denté par l'exposition aux champs est mise en avant (Arrias-Carrion *et al.* 2004 ; Cuccurazu *et al.* 2010, décrit ci-

dessous). En effet, le lien causal entre neurogenèse et augmentation de la plasticité hippocampique est bien argumenté dans la littérature (e.g. Zhao *et al.* 2006 ; Saxe *et al.* 2006). Une 2^e hypothèse impliquerait une modification des radicaux libres, les champs les convertiraient en molécules moins actives et les dégraderaient pour les éliminer.

L'équipe de Grassi a publié plusieurs articles visant à investiguer les effets d'une exposition aux champs basses fréquences sur le processus de neurogenèse dans l'hippocampe :

En 2010, Cuccurazu *et al.* ont cherché si l'exposition aux champs (50 Hz, 1 mT) a un effet sur la neurogenèse dans l'hippocampe de souris Balb/c *in vivo* et, si tel est le cas, à identifier les mécanismes biologiques sous-jacents. Soixante-et-onze souris mâles séparées en 2 groupes (groupe exposé et groupe d'exposition factice, pendant 7 jours) ont été utilisées. L'exposition à des champs basses fréquences entraîne une augmentation de la neurogenèse (incorporation de BrdU, reflet d'une réplication cellulaire et expression de la doublecortine, un gène exprimé dans les précurseurs neuronaux) au niveau du gyrus denté de l'hippocampe. Par RT-PCR, les chercheurs ont observé dans cette région une augmentation des transcrits de gènes pro-neuronaux codant des protéines comme Mash1, NeuroD2, Hes1, ainsi que pour des sous-unités des canaux calciques voltage-dépendants (VGCCS) de type Cav1.2. L'expression accrue des canaux NeuroD1, NeuroD2 et Cav1 a également été montrée par une analyse des protéines en *western-blot*. Les expériences d'immunofluorescence ont montré que, 30 jours après la stimulation par exposition aux champs, environ la moitié des neurones immatures nouvellement générés avaient survécu et étaient devenus des cellules matures intégrées dans la couche granulaire du gyrus denté. Enfin, les expériences électro-physiologiques sur tranches d'hippocampe ont montré que les nouveaux neurones influencent la plasticité synaptique de l'hippocampe (augmentation de la potentialisation à long terme ou LTP). Ces résultats suggèrent que l'exposition aux champs peut augmenter la neurogenèse *in vivo*. Les auteurs de cet article bien construit concluent sur l'éventuelle utilisation des champs basses fréquences en médecine régénérative.

En 2014, Leone *et al.* ont poursuivi leurs recherches pour déterminer si l'augmentation de la neurogenèse (voir aussi Cuccurazu *et al.* 2010, ci-dessus) induite par les champs a un effet sur les capacités de mémoire spatiale et d'apprentissage chez la souris, et si tel est le cas, quels sont les mécanismes impliqués. L'étude a été séparée en deux parties :

1 - une étude *in vivo* visant à évaluer les effets d'une exposition à un champ basse fréquence sur le comportement des animaux (cf. § 7.2.3.1) et sur la différenciation et l'intégration des nouveaux neurones issus de la neurogenèse dans la couche granulaire du gyrus denté de l'hippocampe ;

2 – une étude *in vitro* pour déterminer l'expression des protéines et des gènes spécifiques en ciblant les régulations épigénétiques.

Trente-huit souris mâles (C57bl/6) âgées de 4 à 5 semaines ont été réparties en deux groupes : un groupe d'exposition factice et un groupe exposé à un champ (50 Hz, 1 mT, 3,5 h / jour pendant 12 jours). Trois expériences ont été réalisées : le test de la piscine de Morris, le test de la reconnaissance d'objet, et la recherche de neurogenèse par immunohistochimie 24 h ou 40 jours après la fin de l'exposition.

Pour l'étude *in vitro*, des cerveaux de nouveau-nés de souris C57bl/6 ont été disséqués afin d'isoler l'hippocampe et les cellules ont été mises en culture. Les cellules ont été exposées aux mêmes signaux basses fréquences que les souris *in vivo* (50 Hz, 1 mT) mais seulement 24 h / jour pendant 2 jours consécutifs. Différentes expérimentations ont été réalisées pour rechercher la prolifération des cellules souches, l'expression d'un certain nombre de gènes et pour analyser les processus épigénétiques pouvant être impliqués suite à l'exposition au champ magnétique.

Les résultats présentés dans cet article dense et complet permettent de tirer les conclusions suivantes :

L'exposition des animaux au champ magnétique améliore leur performance de mémoire (cf. § 7.2.3.1). L'exposition au champ stimule la prolifération et la différenciation des cellules souches neuronales de l'hippocampe, grâce à des mécanismes de régulation épigénétique entraînant une expression génique pro-proliférative. Après exposition, les auteurs ont constaté une augmentation de l'expression de plusieurs gènes impliqués dans la différenciation, et notamment NeuroD1 et

Neurogenin1. Ces événements sont associés à une acétylation accrue de l'histone H3K9 et à la liaison de phosphoCREB sur les promoteurs de ces gènes neuronaux essentiels à la neurogenèse. Ces résultats soulignent le rôle important que semble jouer le remodelage de la chromatine avec l'acétylation des histones responsable de l'ouverture de la chromatine et donc de l'augmentation de la transcription et de l'expression de gènes spécifiques. Cette étude met en évidence un nouveau mécanisme d'action des champs sur l'augmentation de la neurogenèse adulte. Les auteurs concluent sur les perspectives dans le domaine de la recherche sur les cellules souches en thérapeutique avec notamment l'utilisation possible de ces champs basses fréquences en médecine régénérative.

Li, Yan *et al.* (2014c) se sont intéressés à l'impact des champs basses fréquences sur l'expression d'un facteur neurotrophique précoce, le *Bdnf*, et sa régulation *via* le calcium dans des cultures de neurones ganglionnaires issus de la corne dorsale de la moelle épinière de rats nouveau-nés. Les cultures de cellules nerveuses ont été exposées pendant 2 h à 37°C, à un signal 50 Hz à des niveaux de champs d'intensité 0,1 - 1,0 - 10 et 100 mT. Les auteurs ont mesuré l'expression du *Bdnf* à l'aide de techniques classiques (RT-qPCR, immunohistochimie, *western-blot*). Les résultats montrent qu'une exposition à 1 mT augmente l'expression du *Bdnf* à 1 et 3 jours après l'exposition. Aux intensités plus élevées (10, 100 mT), cette augmentation est moins marquée. L'étude a été poursuivie avec les conditions pour laquelle niveau d'expression du *Bdnf* est le plus marqué (1 mT et 3 jours après la fin de l'exposition). Les auteurs ont également mesuré le calcium intracellulaire et ils ont observé une augmentation de sa concentration sous exposition. Grâce à une approche pharmacologique visant à moduler le calcium intra- ou extracellulaire, les chercheurs ont montré que l'augmentation de l'expression de l'ARNm du *Bdnf* est dépendante de l'influx de calcium au travers de la membrane cellulaire et implique les ions Ca^{2+} et les canaux calciques voltage-dépendants (VGCCs). De plus, la surexpression du gène du *Bdnf* est probablement liée à la voie ERK stimulée par le calcium, lui-même induit par l'exposition aux champs basses fréquences.

Sur le thème de l'effet des expositions aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la plasticité neuronale et la neurogenèse, 5 études ont été publiées dans la période 2010-2015. Toutes décrivent un effet de l'exposition, cependant elles ont toutes utilisé des niveaux de champs supérieurs ou égaux à 500 μ T, ce qui n'est pas représentatif des expositions résidentielles, mais peut survenir dans certaines catégories professionnelles. On peut aussi souligner que trois articles décrivent des effets neuroprotecteurs (Rauš *et al.*, 2013, Cuccurazu *et al.*, 2010 et Leone *et al.*, 2014) qui méritent d'être reproduits.

7.2.5 Études sur l'horloge circadienne et la mélatonine

L'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur la sécrétion de mélatonine a fait l'objet d'un paragraphe dans le rapport d'expertise « Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques » (Anses, 2015) et dans le rapport d'expertise sur l'électrohypersensibilité (Anses, 2018). De nombreux travaux ont été réalisés depuis plus de 30 ans sur les conséquences de l'exposition aux basses fréquences (50 et 60 Hz) sur les concentrations de cette hormone, en lien avec la survenue du cancer du sein notamment (Touitou et Selmaoui 2012). L'« hypothèse mélatonine » postulait la suppression de la mélatonine par l'exposition aux champs. Celle-ci était soutenue par quelques travaux chez l'être humain (volontaires et travailleurs dans différentes conditions d'exposition) et l'animal, qui montraient une baisse des concentrations circulantes et urinaires de mélatonine sous l'effet d'une exposition, aiguë le plus souvent, aux ondes électromagnétiques. Cependant, de nombreuses études épidémiologiques et expérimentales montrent des résultats contradictoires, ce qui a conduit à fortement fragiliser l'hypothèse d'une altération de la sécrétion de mélatonine sous l'influence de champs électromagnétiques (Touitou et Selmaoui 2012, Lewczuk *et al.* 2014). Un des points délicats est le fait que la sécrétion de mélatonine est sous la dépendance de nombreux facteurs (masse corporelle, alcool, genre, âge, etc.) qui représentent des facteurs confondants non pris en compte dans un certain nombre d'études et qu'il existe une variabilité interindividuelle très importante.

Les deux articles de Jahandideh publiés en 2010 (Jahandideh, 2010 et Jahandideh et Abdolmaleki, 2010) visaient à identifier un éventuel lien entre la sécrétion de mélatonine et l'exposition aux champs électromagnétiques. Il s'agit de deux méta-analyses qui ne présentent pas de résultats originaux, mais qui rappellent que les études menées chez l'humain adulte sont de courtes durées (inférieures à 2 semaines) ; alors que parmi celles menées chez les animaux de laboratoire (surtout le rat adulte et le jeune adulte) seules les études de longues durées (supérieures à 1 mois) montrent une réduction de l'amplitude du rythme de sécrétion de mélatonine, avec une diminution du pic nocturne.

Les résultats de Dyche *et al.* analysés sont en contradiction avec cette observation. Dyche *et al.*, se sont intéressés aux effets de l'exposition aux ondes électromagnétiques basses fréquences sur les sécrétions de mélatonine et sur la structure du sommeil (Dyche *et al.*, 2012). Dix-huit rats Sprague-Dawley mâles âgés de 4 à 7 mois ont été exposés à un champ d'intensité 100 μT pendant 1 mois. L'urine a été recueillie au cours des 3 derniers jours de la période d'exposition pour l'analyse de la 6-sulfatoxymélatonine, métabolite majeur de la mélatonine dans l'urine. Le sommeil a été analysé sur une période de 24 heures. Les auteurs observent que la production de mélatonine est légèrement mais significativement augmentée chez les animaux exposés. L'analyse du sommeil ne révèle aucune modification significative de sa structure, même si une diminution des mouvements oculaires rapides est observée. Les auteurs concluent que l'exposition aux champs basses fréquences induit une augmentation de la sécrétion de mélatonine, ce qui aurait pour conséquence de légères modifications de l'architecture du sommeil du rat.

Manzella *et al.* (cf. 7.1.4.1) ont étudié les effets des champs magnétiques basses fréquences sur l'expression des gènes régulant l'horloge circadienne. Ils observent une perturbation de l'expression cyclique de tous ces gènes, ce qui suggère que les champs basses fréquences pourraient être capables d'interférer avec les processus physiologiques circadiens. Cependant, ces perturbations dépendent fortement du protocole employé.

L'ensemble de ces études souligne combien les résultats dans ce domaine sont hétérogènes et ne permettent pas de valider cette hypothèse comme mécanisme d'action potentiel de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'organisme.

7.2.6 Effet sur la nociception

L'équipe de Prato *et al.* a mené une série d'études sur les effets des champs magnétiques statiques et basses fréquences sur la nociception (stimulus thermal aversif). Leurs travaux antérieurs ont montré chez la souris que l'exposition dans un environnement blindé (très forte atténuation) à des champs magnétiques inférieurs à 0,03 μT , à une densité de puissance inférieure à 0,05 W/m^2 , dans une chambre en mu-métal, pendant 1 h / jour avait un effet analgésique en condition d'obscurité (Prato *et al.*, 2005), et que cet effet robuste (équivalent à 5 mg / kg de morphine) était annihilé par la lumière (0,6 W/m^2 , 400 - 750 nm, Koziak *et al.*, 2006). Ces auteurs ont également montré que l'effet nociceptif de la lumière dépendrait à la fois de la longueur d'onde et de l'intensité (lumière UV et bleue, alors que la lumière rouge est sans effet, Prato *et al.*, 2009). Il est à noter qu'un effet similaire d'atténuation par la lumière en fonction des 2 facteurs, intensité et longueur d'ondes, a été observé pour le sens magnétique chez les oiseaux (Prato *et al.*, 2009). Enfin, l'effet analgésique d'un environnement blindé est inhibé par l'administration concomitante de Naloxone, un antagoniste des récepteurs opioïdes, ce qui laissait supposer un mécanisme impliquant le système opioïde (Prato *et al.*, 2005).

Pour préciser ces observations, Prato *et al.* (2011) ont utilisé un protocole où les animaux étaient placés dans une chambre en mu-métal dans laquelle des ondes à des fréquences et des intensités connues étaient introduites de manière contrôlée. Dans ces conditions, des paramètres liés à la perception douloureuse ont été mesurés. L'exposition a été réalisée dans un appareil « maison » très bien décrit (de nombreuses précautions ont été prises pour éviter les ondes « parasites » entrantes). Les conditions d'atténuation du bruit de fond et les ondes ambiantes dans l'appareil de stimulation sont particulièrement détaillées. Au total, 120 souris Swiss mâles CD-1 ont été réparties dans 4 protocoles expérimentaux, comprenant chacun six conditions :

- Protocole 1 : un groupe exposition factice, un groupe servant de contrôle positif pour la perception de la douleur suite à un stimulus thermique (sans exposition), et 4 groupes exposés à 30 Hz, à des intensités variables : 25, 50, 100, 500 nT (20 souris par groupe) ;
- Protocole 2 : exposition factice, contrôle positif, 120 Hz à 25, 50, 100 et 500 nT (20 souris par groupe) ;
- Protocole 3 : exposition factice, contrôle positif, 60 Hz à 300 nT, 240 Hz à 300 nT, 10 Hz à 200 nT et 100 Hz à 500 nT (10 souris par groupe) ;
- Protocole 4 : exposition factice, contrôle positif, 50 Hz à 120 nT, 100 Hz à 60 nT, 25 Hz à 240 nT, 12,5 Hz à 480 nT (30 souris par groupe).

La sensibilité des animaux à la douleur est évaluée par la latence de retrait et le léchage de la patte après un stimulus thermique (50°C). Les résultats des expériences 1 et 2 montrent une forte atténuation de l'analgésie à 30 Hz, avec un effet fortement lié à l'intensité, alors qu'à 120 Hz un effet maximal est observé dès 25 nT. La 3^{ème} expérience montre également une forte atténuation de l'analgésie à toutes les fréquences sauf à 60 Hz. La 4^{ème} expérience montre une forte réduction de l'analgésie pour toutes les conditions, démontrant que ce type d'effet ne dépend pas de la fréquence ou de l'intensité des champs seuls mais fortement d'une combinaison des 2 facteurs (valeur du produit = 6 000 nT.Hz). Ceci confirme leurs données précédentes concernant les effets de la lumière (Prato *et al.*, 2009). Les auteurs concluent que les ondes pourraient, *via* un mécanisme de transduction biophysique qui reste à démontrer, contribuer à l'atténuation d'une analgésie induite.

7.3 Autres effets

7.3.1 Études sur les os et les dents

Un certain nombre de publications se sont intéressées aux effets des ondes sur la croissance et/ou le développement des os et des dents. Cet aspect est à mettre en relation avec les utilisations thérapeutiques des ondes électromagnétiques sur la résorption et la croissance osseuse. Ces travaux ont, en général, des objectifs et des résultats assez éloignés de préoccupations en lien avec la présente saisine, mais ils mettent en évidence des effets biologiques qui ne sont pas à négliger.

7.3.1.1 Effets des ondes sur les os.

L'équipe d'Akdağ a analysé les effets des ondes électromagnétiques basses fréquences sur les os. Une étude, qui a donné lieu à deux publications, a été menée chez le rat Sprague Dawley. Trente rats mâles adultes ont été exposés ou non à un champ électromagnétique 50 Hz à des intensités de 100 ou 500 μT , 2 heures par jour pendant 10 mois, dans un appareillage développé par les auteurs. L'appareil est décrit et l'homogénéité de l'exposition a été vérifiée. À la fin de l'exposition, les animaux sont mis à mort, puis du sang et les fémurs sont récupérés.

La première publication (Akdağ *et al.*, 2010b) décrit les tests biomécaniques effectués sur l'os (mesures de différents paramètres de l'os tels que la rigidité et la dureté) et les analyses histologiques des os. Les analyses biomécaniques ont montré une diminution significative de la section transversale de l'arbre fémoral chez les rats exposés à 100 μT et à 500 μT par rapport aux rats témoins. De plus, la charge maximale (résistance à la traction) est augmentée chez les rats exposés à 100 μT et 500 μT . En revanche, l'épaisseur corticale des fémurs de rats exposés aux champs, que ce soit à 100 ou 500 μT , est diminuée. Aucune différence significative n'a été trouvée pour les autres paramètres biomécaniques (longueur du fémur, déplacement, rigidité, capacité d'absorption d'énergie, élasticité et dureté de l'os). Les auteurs concluent que l'exposition à 100 ou 500 μT peut affecter les propriétés biomécaniques de l'os chez le rat.

Dans une seconde publication, les chercheurs ont analysé l'impact de cette exposition sur les teneurs en minéraux des os (Ulku *et al.*, 2011). L'expérimentation a été réalisée sur les mêmes rats mâles Sprague Dawley que précédemment. Trois groupes ont été formés à partir de 21 animaux : un groupe contrôle et deux groupes expérimentaux qui ont reçu soit 100 μT soit 500 μT , 2 heures par jour, 7 jours par semaine pendant 10 mois. À la suite de l'exposition, le dosage de différents éléments minéraux est effectué dans les côtes des rats (calcium, magnésium, cuivre, fer, zinc, phosphore). Les données présentées ne montrent aucun changement des teneurs osseuses en phosphore, en cuivre et en fer. La teneur en calcium, en magnésium et en zinc des côtes est diminuée dans le groupe ayant été exposé à 500 μT . Les auteurs concluent que l'exposition à long terme aux basses fréquences peut affecter la structure et le métabolisme de l'os chez le rat, en modulant les niveaux de minéraux comme le calcium, le zinc, et le magnésium.

L'objet de l'étude de Manjhi *et al.* (Manjhi *et al.* 2013) est de rechercher le rôle des champs basses fréquences sur l'ostéoporose d'inactivité induite par une lésion de la moelle épinière. Cette étude est menée sur des rats Wistar élevés en cage individuelle. Au total, 24 animaux sont répartis en 3 groupes : un groupe d'exposition factice, un groupe SCI (*section spinal cord*) et un groupe subissant le co-traitement SCI + ondes. L'exposition est assurée par un appareil développé par les auteurs qui produit un champ uniforme de 17,96 μT à 50Hz. Les animaux sont exposés 2 heures par jour pendant 8 semaines. Suite à l'exposition, la fonction locomotrice, le volume osseux et la densité osseuse ont été mesurés. Le contenu de l'os en calcium, carbone et phosphore, ainsi que les teneurs en collagène I, en ostéocalcine et en phosphatase alcaline ont été déterminés. Les données rapportées par ces auteurs montrent que l'ostéoporose induite par la section de la moelle est atténuée si l'animal a été exposé aux ondes. Ces effets sont estimés à la fois par des approches histologiques et biochimiques. Les données présentes montrent également une restauration partielle de l'activité locomotrice chez les animaux ayant été exposés aux basses fréquences mais pas chez les non exposés.

7.3.1.2 Effets des ondes sur les dents

L'objectif de l'article de Kaya *et al.* (2011) était de déterminer les effets éventuels des ondes électromagnétiques basses fréquences sur la structure des dents et le tissu périodontal. Cette étude a été menée sur 27 rats Sprague Dawley mâles, âgés de 4 mois au début de l'expérience. L'exposition est réalisée dans un appareil développé par les auteurs et les animaux sont exposés à des niveaux de 100 et 500 μT (50 Hz) 2 heures par jour pendant 10 mois. Les auteurs ont mené une étude histologique des dents et des tissus périodontaux. Le protocole expérimental est bien détaillé et les résultats bien décrits. Ils ne montrent pas de différences entre exposition ou non pour l'essentiel des paramètres étudiés, sauf pour ce qui concerne l'os alvéolaire, la pulpe et la gingiva où la structure histologique et notamment la vasodilatation était plus marquée après exposition.

Dans l'étude publiée par Ince *et al.* en 2012 (Ince *et al.*, 2012), le but était de rechercher d'éventuelles interactions entre l'exposition à des champs électromagnétiques basses fréquences et le métabolisme du calcium, du phosphore, du zinc et du magnésium dans le contexte de l'apparition de caries dentaires. Cette étude a été réalisée sur 64 rats Wistar mâles (huit groupes de 8 rats). Parmi ces groupes, certains ont reçu une supplémentation en manganèse (0, 3,75, 15 et 60 mg/kg), associée ou non à une exposition aux champs basses fréquences, à raison de 4 h par jour pendant 45 jours (50 Hz, 1 mT). La source des rayonnements est un appareil réalisé par les auteurs, dont la description est imprécise. En revanche, il est indiqué que l'exposition est réalisée dans une cage de Faraday pour limiter les expositions parasites. Des modifications des teneurs en calcium, phosphore, zinc et magnésium dans les dents, ont été recherchées à la suite d'une exposition aux champs électromagnétiques. Les résultats suggèrent que l'exposition aux champs basses fréquences diminue les teneurs en calcium et phosphore des dents et augmente les teneurs en zinc et magnésium, ce qui favoriserait les caries. Cependant, aucun mécanisme n'est proposé par les auteurs pour étayer cette hypothèse.

7.3.2 Études sur la fonction testiculaire et sur la thyroïde

L'étude de Saadeldin *et al.* visait à identifier si l'exposition à des champs basses fréquences affecte la fonction testiculaire chez le rat (Saadeldin *et al.*, 2011). Vingt-huit rats Wistar de 6 mois ont été répartis en 4 groupes (7 animaux par groupe). Les animaux du groupe 1 et 3 ont été exposés de façon continue pendant 21 jours à un champ magnétique d'intensité 100 μT (50 Hz). Les animaux du groupe 1 ont été mis à mort à la fin de l'exposition tandis que les animaux du groupe 3 ont été gardés 2 jours sans exposition avant sacrifice. Les groupes 2 et 4 sont les groupes contrôles (groupe d'exposition factice) des groupes 1 et 3, respectivement. Le système d'exposition, développé par les auteurs, est bien décrit et permet une exposition bien contrôlée. Après exposition, les animaux sont mis à mort et le sang et les testicules sont prélevés. Une mesure de la motilité spermatique est effectuée ainsi qu'une numération spermatique. Sont également mesurés des antioxydants spermatiques et la testostérone sérique (cf. § 7.1.3.2). Les données obtenues permettent de montrer que l'exposition à un champ basse fréquence provoque une diminution de la masse des testicules, avec des modifications histologiques marquées par la présence de cellules apoptotiques et des dommages dans les canaux séminifères. Une diminution sévère de la motilité spermatique est retrouvée (divisée par 3) dans le groupe 1 par rapport au groupe 2 et cette motilité spermatique est fortement diminuée dans le groupe 3 par rapport au 4. Le pourcentage de viabilité est aussi massivement diminué après exposition, ainsi que le pourcentage d'anomalies structurelles, qui sont multipliées par 10 environ. Le taux de testostérone est augmenté dans le groupe 1 (x5 par rapport aux contrôles), mais aucune différence n'est notée entre le groupe 3 et le groupe 4, ce qui semble indiquer que cet effet est transitoire. Les paramètres biologiques mesurés en matière de stress oxydant montrent la présence d'un stress oxydant chez les animaux du groupe 1. En conclusion, des effets extrêmement marqués vont tous dans le même sens. En revanche, la réversibilité en matière de viabilité ou d'altération de cellules spermatiques en 2 jours semble difficile à comprendre, les auteurs n'apportent pas d'éléments de réflexion vis-à-vis de cet aspect.

Cet effet de l'exposition sur la fonction testiculaire n'a pas été retrouvé dans les 2 autres études réalisées par 2 autres équipes de recherche.

L'équipe d'Akdağ a mené une expérimentation sur trois lots de rats Sprague Dawley âgés de 4 mois (Akdağ *et al.*, 2013b, *cf.* 7.1.3.2). Trente animaux ont été séparés en trois groupes : un groupe témoin et deux groupes expérimentaux exposés à 100 et 500 μ T, deux heures par jour, 7 jours par semaine durant 10 mois. Une fois l'exposition terminée, les animaux ont été tués et l'épididyme gauche a été prélevé pour déterminer les paramètres du sperme. L'analyse du sperme dans les trois lots n'a pas révélé de différences, ni en matière de nombre, ni en matière de formes anormales. L'activité de la caspase 3 détectée par immunohistochimie dans les testicules ne permet pas de déceler de différences significatives entre les différents lots. Au vu de ces résultats, les auteurs concluent à l'absence d'effet de l'exposition aux ondes sur les phénomènes d'apoptose dans les testicules et à l'absence d'effet sur la fonction et la structure testiculaire.

Duan *et al.* ont recherché les effets des ondes sur la fonction testiculaire (Duan *et al.*, 2014). Quarante rats SD ont été exposés à un champ 50 Hz d'intensité 500 μ T, 4 h / jour, 7 jours / semaine pendant 4 et 8 semaines. Plusieurs paramètres biologiques liés à la fonction testiculaire et à la spermatogenèse ont été mesurés : la masse corporelle, la masse des testicules et de l'épididyme, le nombre de spermatozoïdes, le pourcentage de cellules anormales dans le sperme et le taux de testostérone sérique. Une analyse histologique permettant d'évaluer l'activité testiculaire a également été réalisée. Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les rats témoins et les rats exposés dans ces paramètres analysés, quelle que soit la durée de l'exposition. Les auteurs suggèrent que l'absence d'effet provient de l'absence de variation de la concentration de testostérone sérique.

Dans l'étude de Rajkovic *et al.* (2010), les effets d'un perturbateur endocrinien seul ou en association avec une exposition à des ondes basses fréquences ont été évalués avec un modèle de rat Wistar. Les animaux sont exposés à des niveaux de champ compris entre 100 et 300 μ T (50 Hz), 4 heures par jour. L'exposition est variable car l'intensité du champ n'est pas constante partout dans la cage d'expérimentation et ce manque d'homogénéité de l'exposition est gênant pour l'interprétation des résultats. Au total, 60 rats sont utilisés dans ces expériences et répartis dans 6 groupes expérimentaux de 10 rats chacun. Les traitements sont effectués dès l'âge de 23 jours, pendant 30 jours. Les auteurs ont étudié les effets individuels et croisés des champs et de l'atrazine, un herbicide connu pour être un perturbateur endocrinien interagissant avec le système thyroïdien. Ainsi, les 6 groupes d'animaux sont les suivants : 1- témoins, 2- BF seuls, 3- atrazine seule faible concentration, 4- atrazine seule forte concentration, 5-BF + atrazine faible concentration et 6- atrazine forte concentration + BF. À la fin de l'expérimentation, les rats sont mis à mort, les thyroïdes prélevées, et différents paramètres anatomiques et histologiques sont déterminés par microscopie optique et électronique. Il ressort de ces expériences que l'exposition aux champs n'a pas d'effet sur la structure globale de la thyroïde. La taille, la forme et la composition cellulaire ne sont pas altérées par le traitement. Les résultats ne montrent pas d'effet de l'exposition aux champs sur le développement de la thyroïde chez le rat en période post-sevrage. Cependant, considérant l'inhomogénéité de l'exposition, ces résultats sont à prendre avec précaution.

En ce qui concerne la fonction testiculaire, les études sont contradictoires et il est difficile d'expliquer les résultats observés : les modèles biologiques sont très proches dans les deux cas (rats Wistar et rats SD), l'hypothèse d'une spécificité du modèle peut sans doute être écartée. La principale différence pourrait venir du mode d'exposition : continue pendant 21 jours pour Saadeldin *et al.* (2011), alors que l'exposition est discontinue et chronique pour Akdağ *et al.* (2013b) ou subchronique pour Duan *et al.* (2014). Des expériences supplémentaires sont nécessaires pour conclure.

En ce qui concerne l'impact des champs électromagnétiques basses fréquences sur la fonction thyroïdienne, les résultats disponibles sont trop parcellaires pour conclure.

8 Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires potentiellement liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

8.1 Méthodologie de classification du niveau de preuve

Pour évaluer le niveau de preuve associé à un effet sanitaire donné, le groupe de travail a analysé les nouvelles publications recensées rapportant les résultats d'études épidémiologiques et expérimentales (période 2010-2015). La détermination du poids des preuves apporté par les études épidémiologiques d'une part (sur l'Homme) et par les études expérimentales (*in vivo* sur l'animal et *in vitro*) d'autre part a été réalisée en s'appuyant sur l'utilisation de logigrammes présentés dans le chapitre 2. L'évaluation du niveau de preuve du lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et un effet sanitaire donné est obtenue en combinant les conclusions établies de façon indépendante à partir des études épidémiologiques d'une part et des conclusions des études expérimentales d'autre part. Certaines expositions professionnelles aux champs électromagnétiques étant largement supérieures à l'exposition environnementale, des évaluations de preuves distinctes ont pu être déclinées pour le même effet sanitaire chez les travailleurs et dans la population générale.

Les études épidémiologiques constituent le premier volet de l'appréciation du niveau de preuve associé au danger (effet potentiel sur la santé) effectuée par le groupe de travail. Ces études peuvent fournir des arguments forts quant à la possibilité d'établir un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et un risque sanitaire, car elles recherchent l'existence d'associations statistiques entre l'exposition aux champs et certaines pathologies. La limite de cette approche utilisée seule est l'impossibilité de prouver l'existence d'un lien causal. L'évaluation de la causalité du lien fait intervenir la recherche de mécanismes biologiques pouvant expliquer l'apparition de l'effet sanitaire, qui nécessitent la mise en place d'expériences *in vivo* et *in vitro*. L'analyse de ces études expérimentales constitue ainsi le second volet de l'appréciation globale du niveau de preuve associé à un effet sanitaire. Pour cela, le groupe de travail a procédé en deux étapes : 1) analyse des articles ayant utilisé un modèle animal pour étudier l'impact de l'exposition sur une pathologie donnée ; 2) en l'absence de publication ayant spécifiquement étudié cette pathologie dans un modèle animal, le groupe de travail a inclus dans l'analyse les études dont le sujet peut être en relation indirecte avec la pathologie. Ainsi, certains chercheurs n'ont pas analysé directement le pouvoir cancérigène des champs basses fréquences, mais ont recherché si ces ondes pouvaient générer un stress génotoxique, ou un stress oxydant sur des cellules en culture. Sachant que l'oxydation de l'ADN et/ou la présence de mutations ont été retrouvées de façon anormalement élevée dans de nombreuses tumeurs, on peut considérer que l'analyse de ces articles entre judicieusement dans l'évaluation globale de l'effet potentiel d'une exposition aux champs électromagnétiques sur le développement du cancer. Il en va de même pour les études qui se sont penchées sur la prolifération cellulaire, ou sur la différenciation cellulaire, puisque ces phénomènes biologiques sont impliqués dans le processus de cancérogenèse. En ce qui concerne les maladies neurodégénératives, en l'absence d'études spécifiquement dédiées à ces pathologies, le groupe de travail a recherché l'existence de publication(s) ayant trait à l'homéostasie protéique et au stress protéotoxique (stress portant atteinte à l'intégrité des protéines). L'analyse sur le stress oxydant a également été incluse dans ce cas, car il est maintenant admis qu'un déséquilibre oxydatif est impliqué dans la genèse ou la progression de certaines maladies dégénératives, notamment la maladie d'Alzheimer ou la sclérose latérale amyotrophique (Mattson et Simko, 2014).

Le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et chaque pathologie étudiée est *in fine* classé dans l'une des catégories ci-dessous, en fonction des données scientifiques disponibles et des incertitudes associées :

- Effet avéré pour l'Homme.

- Effet probable pour l'Homme.
- Effet possible pour l'Homme.
- Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence, ou non, d'un effet.
- Probablement pas d'effet chez l'Homme.

8.2 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer de l'enfant

8.2.1 Leucémie de l'enfant

En 2010, l'Afsset concluait « 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 ».

Depuis 2010, deux études poolées ont rapporté un excès de risque de leucémie aiguë de l'enfant lié au fait de résider à moins de 50 m de lignes électriques à haute tension (Kheifets *et al.*, 2010) ou à une exposition à un champ magnétique basse fréquence supérieur à 0,2 μT (Zhao *et al.*, 2014). Ces études ont pris en compte les données des études cas/témoins réalisées durant la période 2000-2010. De plus, en 2013, l'étude Géocap, conduite en France, a rapporté l'existence d'un lien entre un excès de risque de leucémie aiguë de l'enfant et le fait de résider à moins de 50 m de lignes électriques de tensions supérieures à 225 kV, association statistiquement significative uniquement pour les enfants de moins de 5 ans.

Cependant, l'ensemble des autres études originales réalisées entre 2010 et 2015, y compris une étude de grande envergure (Crespi *et al.*, 2016), ne montrent pas d'association significative entre exposition aux champs et leucémie infantile, que la caractérisation de l'exposition soit basée sur la distance aux lignes de transport d'électricité ou sur des mesures de champ magnétique. De plus, les études de Bunch *et al.* (2014) et Pedersen *et al.* (2015), réalisées sur de très longues périodes, ne montraient plus d'excès de risque dans les périodes récentes.

Par conséquent, les éléments de preuves apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 sont **limités** en ce qui concerne le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la leucémie infantile.

Concernant les études expérimentales, lors de la période 2010-2015, aucune étude de qualité n'a étudié le lien direct entre l'exposition aux champs basses fréquences et la leucémie infantile.

Quelques études *in vivo* ont analysé des effets biologiques en relation indirecte avec la leucémie chez l'enfant, comme des dégâts à l'ADN dans des précurseurs de cellules sanguines. Udroui *et al.* (2015) ont exposé des souris au cours de leur développement embryonnaire à des champs basses fréquences et ont recherché et trouvé des dommages à l'ADN dans les précurseurs des érythrocytes. Des dégâts à l'ADN ont également été observés dans les cellules de la moelle osseuse de rats exposés juste après leur naissance (Rageh *et al.*, 2012). En association avec d'autres études axées sur le stress génotoxique, ces résultats indiquent que des dommages peuvent avoir lieu dans l'ADN de cellules sanguines de jeunes animaux exposés aux champs basses fréquences. Néanmoins, il faut souligner que ces effets génotoxiques ont été constatés pour des niveaux de champs élevés, bien supérieurs aux niveaux d'exposition rencontrés par le grand public. D'autres études portent sur le stress oxydant et la majorité d'entre elles montrent un impact de l'exposition aux champs basses fréquences pour des niveaux

d'exposition élevés, supérieurs à l'exposition du public. Très peu d'études portent sur des expositions inférieures à 1 mT et leurs résultats sont divergents.

Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie infantile.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 amène le groupe de travail à conclure à l'existence d'un **effet possible** des champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de leucémie infantile (cf. Figure 12).

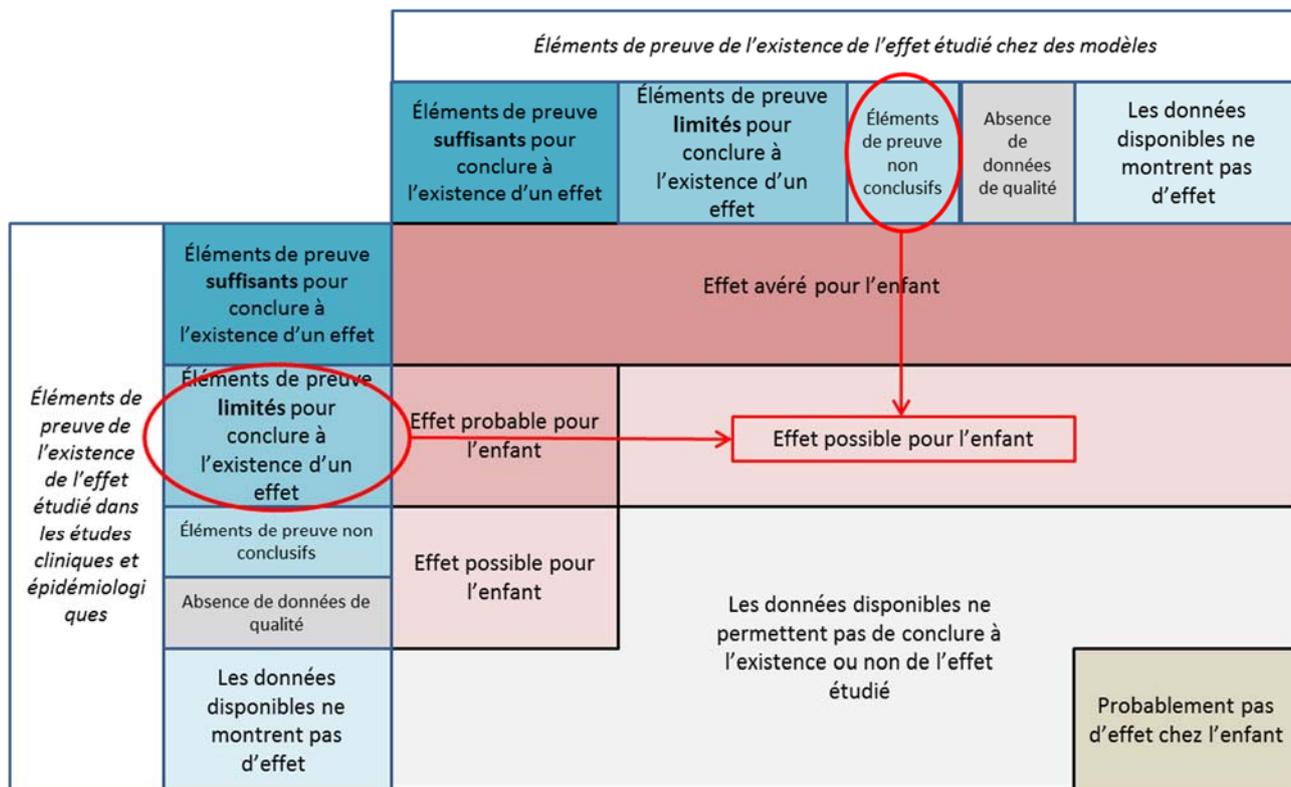


Figure 12 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la leucémie de l'enfant (études 2010 – 2015)

L'ensemble des données disponibles met en évidence un effet possible de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de leucémie infantile.

8.2.2 Autres cancers de l'enfant (système nerveux central)

En 2010, le rapport publié par l'Afsset concluait que « 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 ». Les autres rapports internationaux publiés au cours des dix dernières années fournissent des conclusions similaires.

Lors de la période 2010-2015, plusieurs études se sont intéressées au risque de cancer, autre que les leucémies, chez les enfants habitant à proximité de lignes à très haute tension (Kroll *et al.*, 2010 ; Bunch *et al.*, 2014 et 2015 ; Parodi *et al.*, 2014 ; Kheifets, *et al.*, 2015 ; Crespi *et al.*, 2016). Seule l'étude de Bunch *et al.* (2015) retrouve une augmentation significative du risque de tumeur cérébrale en relation non linéaire avec la distance aux lignes très haute tension souterraines, mais sans relation avec l'exposition aux champs électromagnétiques mesurée, évoquant plutôt un effet aléatoire selon les auteurs (Bunch *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'étude poolée de Kheifets *et al.*

(2010), rassemblant les dix études les plus importantes conduites jusqu'alors, ne montre pas d'augmentation du risque de cancer du système nerveux central.

Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques pour la période 2010-2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de tumeur du système nerveux central chez l'enfant.

Lors de la période 2010 - 2015, aucune étude *in vivo* n'a directement examiné les tumeurs du cerveau chez les jeunes animaux exposés aux champs basses fréquences.

Certaines études expérimentales ont recherché des effets biologiques dans le cerveau de fœtus d'animaux ou d'animaux juvéniles après une exposition aux basses fréquences. Rageh *et al.* (2012) ont rapporté une augmentation du nombre de cassures de l'ADN et du stress oxydant dans des cellules du cerveau de rats nouveau-nés après une exposition à un niveau de champs fort (500 µT). Les études de Saha *et al.* (2014) et Woodbine *et al.* (2015), quant à elles, ne montrent aucun dommage à l'ADN au niveau de cerveau de fœtus de souris, après exposition aux basses fréquences. Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de tumeur du système nerveux central chez l'enfant.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de tumeur du système nerveux central chez l'enfant (*cf.* Figure 13).

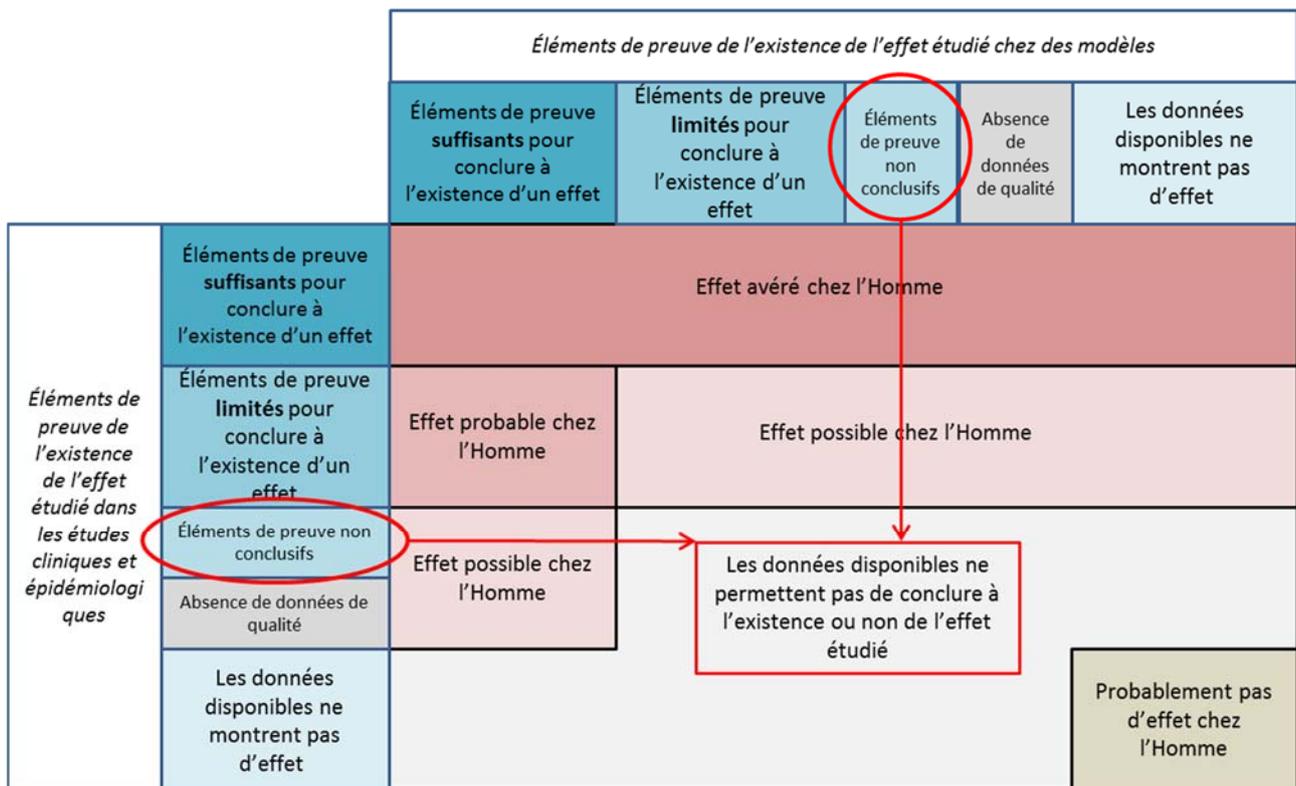


Figure 13 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les cancers du système nerveux central de l'enfant (études 2010 – 2015)

L'ensemble des données **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les autres cancers de l'enfant, et notamment sur les cancers du système nerveux central.

8.3 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer chez l'adulte

8.3.1 Cancer du sein

En 2010, le rapport d'expertise publié par l'Afsset concluait que les quelques données disponibles ne permettaient pas d'évoquer un lien entre le cancer du sein et l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences. L'OMS, en 2007, a conclu que les études n'étaient pas en faveur d'une association entre exposition à des champs magnétiques extrêmement basses fréquences et risque de cancer du sein chez la femme. En 2012, le rapport de l'Efhran, qui s'appuie sur les études antérieures à 2010, a conclu à un manque de preuve concernant l'association entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences et le cancer du sein.

Le groupe de travail a analysé quatre études épidémiologiques de qualité publiées pendant la période 2010-2015 (Chen *et al.*, 2010 ; Elliot *et al.*, 2013 ; Li *et al.*, 2013 ; Koeman *et al.*, 2014). Les résultats présentés dans ces publications ne montrent pas d'association significative entre l'exposition aux champs basses fréquences et le risque de cancer du sein chez la femme. Toutes ces études ont utilisé une cohorte de grande taille, et ont pris un soin particulier à l'estimation de l'exposition (par exemple en utilisant une matrice d'exposition associée aux activités professionnelles). Elles fournissent donc un très bon niveau de preuve. Ces nouvelles données analysées ne confirment pas le risque soulevé par une méta-analyse publiée en 2001 (Erren, 2001). Cette étude avait évoqué l'éventualité d'un faible sur-risque du cancer du sein chez l'adulte. Cependant, l'auteur lui-même avouait que les limites méthodologiques de son étude (liées principalement à l'évaluation de l'exposition) empêchaient de tirer des conclusions définitives au sujet d'une association entre l'exposition aux champs basses fréquences et l'apparition de ce cancer.

Après analyse de ces nouvelles publications, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne montrent pas d'effet** de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition du cancer du sein.

Le groupe de travail de l'Anses n'a recensé qu'une seule étude *in vivo* s'intéressant directement à l'induction ou à la promotion de cancer mammaire par les champs basses fréquences. Fedrowitz *et al.*, en 2012, ont utilisé deux souches de rats présentant, d'après eux, une sensibilité différente à l'exposition aux champs basses fréquences et pour l'une d'entre elles (la souche Fischer 344), une capacité à développer des cancers mammaires après une exposition prolongée (Fedrowitz et Loscher, 2008). Une analyse en *microarray* a été réalisée afin d'analyser l'expression génétique dans les tissus mammaires de ces modèles. Les résultats obtenus montrent une modification extrêmement modeste de l'expression génétique. De plus, aucun gène identifié ne peut être relié au phénomène de cancérisation, ce qui ne permet pas de valider la possibilité d'induire ou de promouvoir le cancer du sein par l'exposition aux champs basses fréquences.

Durant la période 2010-2015, d'autres études se sont intéressées aux effets de l'exposition aux champs basses fréquences sur le stress génotoxique, sur le stress oxydant, sur la prolifération cellulaire ou sur la différenciation cellulaire. Les résultats publiés montrent que dans certaines conditions, et pour certains modèles biologiques, l'exposition aux champs peut interférer avec ces phénomènes biologiques. Utilisant spécifiquement des lignées cellulaires issues de cancers mammaires, Hong *et al.* (2010) n'ont pas mis en évidence de stress oxydant et Jin *et al.* (2014) n'ont pas observé d'effet génotoxique ou co-génotoxique après une exposition aux basses fréquences. Cette absence d'effet n'est pas systématiquement retrouvée dans les études *in vitro* utilisant d'autres types cellulaires, ainsi, le manque de cohérence de l'ensemble des études

expérimentales empêche toute conclusion définitive. Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de tumeurs mammaires.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et expérimentales publiées entre 2010 et 2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du sein.(cf. Figure 14).

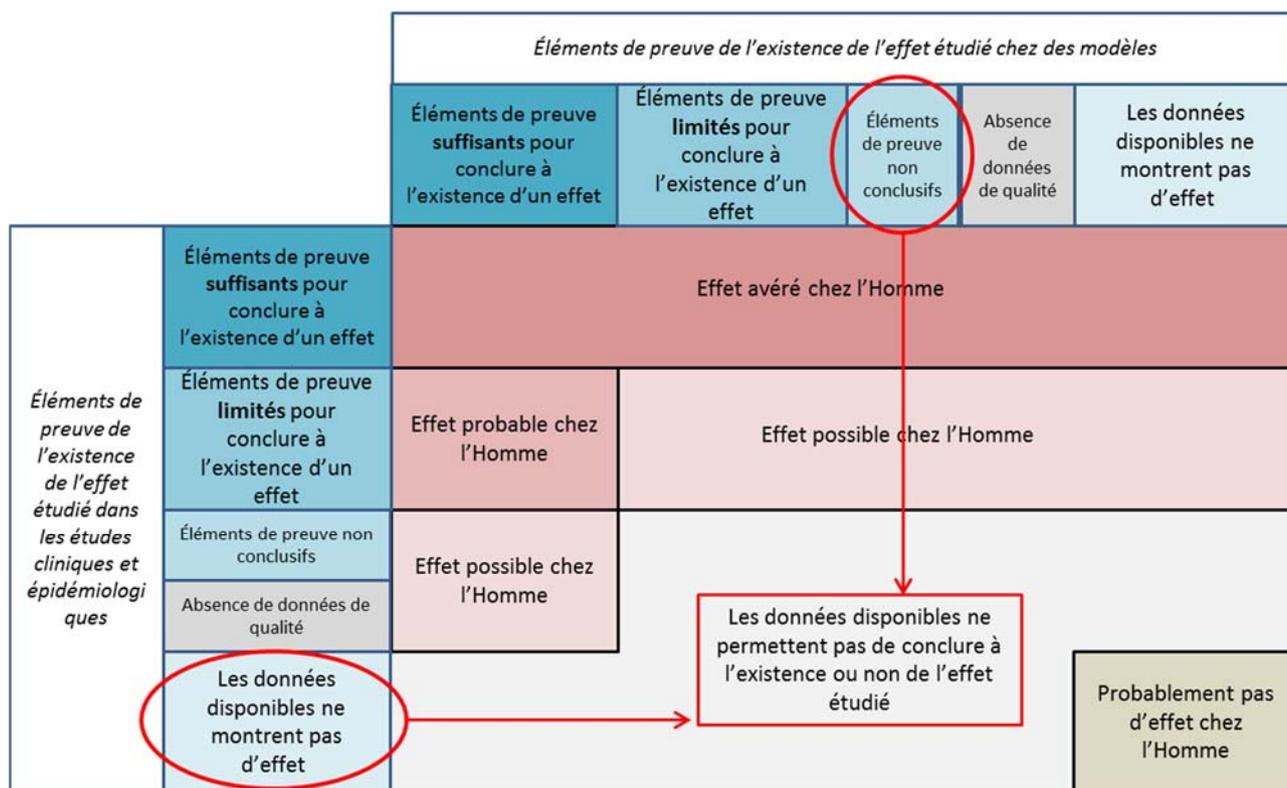


Figure 14 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du sein (études 2010 – 2015)

L'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence du cancer du sein.

8.3.2 Tumeurs du système nerveux central

Le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et le risque de cancers du système nerveux central chez l'adulte a été recherché par des études épidémiologiques, à la fois chez des professionnels et dans la population générale.

Le rapport publié par l'Afsset en 2010 estimait que « 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 ». Les rapports internationaux parus depuis 2010, et notamment le rapport Efrhan 2012 qui a analysé les études antérieures à 2010, concluent à l'absence d'éléments de preuve en faveur d'un lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et les cancers du système nerveux central chez l'adulte (Efrhan, 2012).

8.3.2.1 Exposition professionnelle

Durant la période 2010-2015, quatre études indépendantes se sont intéressées au risque de développer une tumeur cérébrale suite à des expositions professionnelles. L'étude de Baldi *et al.* (2011) montre une augmentation significative du risque de méningiome pour une exposition professionnelle aux basses fréquences estimée grâce à des matrices emploi-exposition. L'étude de Turner *et al.* (2014) montre un lien significatif pour le gliome et à la limite de la significativité pour le méningiome. L'étude de Sorahan (2014a) trouve également une tendance à la limite de la significativité pour le risque de méningiome. L'étude de Koeman *et al.* (2014) ne met pas en évidence de lien statistiquement significatif. Compte tenu de l'hétérogénéité de ces résultats, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un lien** entre les cancers du système nerveux central et l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Pour la période 2010 - 2015, le groupe de travail n'a recensé aucune étude *in vivo* s'intéressant directement à l'induction ou à la promotion de cancers du système nerveux central par les champs basses fréquences.

Les autres études expérimentales montrent que, dans certaines conditions, et pour certains modèles biologiques, l'exposition aux champs peut interférer avec la prolifération cellulaire ou la différenciation cellulaire, ou induire un stress génotoxique ou un stress oxydant au niveau cérébral. Dans la période 2010-2015, toutes les études qui ont exposé des modèles murins à des intensités allant de 100 à 500 μ T, pendant 7 jours à 10 mois, ont trouvé une augmentation du stress oxydant dans le cerveau (Akdağ *et al.*, 2010, 2013 ; Akpınar *et al.*, 2012 ; Cui *et al.*, 2012 ; Rageh *et al.*, 2012 ; Selakovic *et al.*, 2013 ; KantarGor *et al.*, 2014 ; Manikonda *et al.*, 2014). Cependant, ce stress oxydant n'induit pas forcément de stress génotoxique, puisque Mariucci *et al.* (2010), Villarini *et al.* (2013) et Korr *et al.* (2014) n'ont pu observer des dommages à l'ADN au niveau du cerveau que si les souris étaient exposées à des intensités supérieures ou égales à 1 mT. De plus, ils ont montré que ces dégâts à l'ADN étaient transitoires et qu'ils étaient réparés *in vivo* par les systèmes cellulaires de réparation de l'ADN.

Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les tumeurs du système nerveux central.

Concernant l'exposition professionnelle, la combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de cancer du système nerveux central (*cf.* Figure 15).

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'Homme

Figure 15 : évaluation globale de l'effet de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du système nerveux central chez l'adulte (études 2010 - 2015)

L'ensemble des données **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de cancer du système nerveux central chez l'adulte.

8.3.2.2 Exposition environnementale

Concernant les expositions environnementales, Baldi *et al.* (2011) et Elliot *et al.* (2013) n'ont pas mis en évidence de lien statistique significatif entre la distance de l'habitation aux lignes haute-tension et l'apparition de cancer du système nerveux central. De ce fait, les nouvelles données épidémiologiques **ne montrent pas de lien** entre l'exposition résidentielle aux champs électromagnétiques et les cancers du système nerveux central.

En l'absence d'étude *in vivo* spécifiquement axée sur le cancer du système nerveux central, les études expérimentales *in vivo* et *in vitro*, reliées de façon indirecte à la cancérisation, **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs, d'autant plus que la quasi-totalité de ces études ont utilisé des niveaux d'exposition bien supérieurs à ceux rencontrés dans l'environnement.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition du cancer du système nerveux central (*cf.* Figure 16).

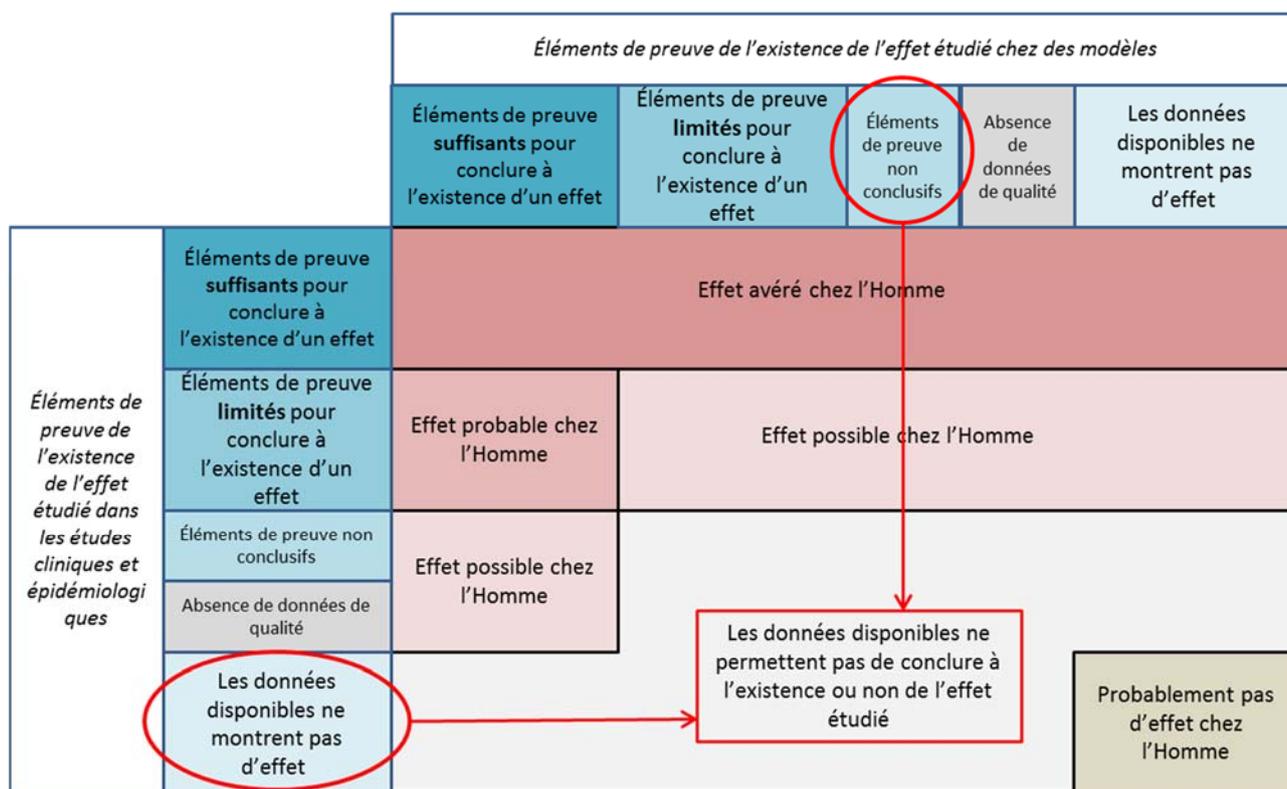


Figure 16 : évaluation globale de l'effet de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer du système nerveux central chez l'adulte (études 2010 - 2015)

L'ensemble des données **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition du cancer du système nerveux central chez l'adulte.

8.3.3 Hémopathies malignes chez l'adulte.

Aucun rapport d'expertise publié précédemment n'a analysé spécifiquement les hémopathies malignes chez l'adulte.

Le Circ, en 2002, concluait que les éléments de preuve étaient inadéquats pour conclure à la cancérogénicité des champs électromagnétiques basses fréquences en relation avec les cancers autres que la leucémie infantile, que ce soit chez l'humain ou l'animal (Circ, 2002). En 2007, l'OMS concluait que les études publiées depuis la monographie du CIRC « ne modifient pas la conclusion selon laquelle les éléments en faveur d'une association entre champs magnétiques extrêmement basses fréquences et ces maladies restent insuffisants ». L'Afssset, en 2010, n'évoquait pas spécifiquement le risque d'hémopathie maligne chez l'adulte et concluait, d'une façon globale que « 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 ».

Les études épidémiologiques publiées durant la période 2010-2015 mettent en avant des résultats hétérogènes, que l'on s'intéresse à l'exposition environnementale ou à l'exposition professionnelle.

Trois études ont analysé le risque sur des cohortes de travailleurs. Seule l'étude de Koeman *et al.* (2014) a montré un sur-risque significatif de leucémie myéloïde aiguë pour les personnels les plus fortement exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences. Ces résultats sont en accord avec ceux publiés par Kheifets *et al.* (2008), mais ils n'ont pas été retrouvés par les deux autres études analysées dans ce rapport (Sorahan 2014b et Talibov *et al.*, 2015).

L'impact de l'exposition environnementale a été étudié par deux nouvelles études. L'étude de Marcilio *et al.* (2011) n'apporte pas d'informations fiables à cause de ses limites méthodologiques. L'étude d'Elliot *et al.* (2013) ne rapporte pas de lien entre l'exposition aux champs basses fréquences et les hémopathies malignes de l'adulte.

Compte tenu de l'hétérogénéité de ces résultats, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les hémopathies malignes de l'adulte.

Plusieurs équipes ont examiné le stress génotoxique dans des modèles de cellules sanguines chez l'Homme, et notamment sur des populations de travailleurs fortement exposés aux champs basses fréquences. Dans ce cas, les chercheurs ont soit trouvé une absence d'effet significatif (Gadhia *et al.*, 2010 ; Tiwari *et al.*, 2015), soit observé un stress génotoxique de très faible ampleur (Balamuralikrishnan *et al.*, 2012), ou encore, à partir des mêmes échantillons, obtenu des résultats divergents suivant les techniques utilisées (Dominici *et al.*, 2011 et Vallarini *et al.*, 2015).

Pour la période 2010 - 2015, le groupe de travail n'a recensé aucune étude *in vivo* s'intéressant directement à l'induction ou à la promotion d'hémopathies après exposition à des champs basses fréquences. Quatre études *in vivo* ont analysé les effets biologiques des basses fréquences sur les cellules sanguines de modèles murins. El-Gebaly *et al.* (2012) et Alcaraz *et al.* (2014) ont observé une augmentation du nombre de cassures de l'ADN faisant suite à des expositions aux basses fréquences à des niveaux de 500 et 200 μT , respectivement. Par ailleurs, Okudan *et al.* (2010) et Wilson *et al.* (2015) n'ont pas trouvé de dommages à l'ADN dans les cellules sanguines de souris exposées à long terme à diverses intensités allant de 1 à 300 μT (50 Hz). Enfin, une étude *in vitro* a retrouvé des cassures de l'ADN dans des cultures primaires de lymphocytes humains après exposition à des basses fréquences (800 μT , 50 Hz pendant 12 à 72 h (Cho *et al.*, 2014).

Ainsi, considérant l'absence d'étude *in vivo* spécifiquement dédiées aux hémopathies, et la divergence des résultats obtenus lors d'études expérimentales reliées de façon indirecte à la cancérisation, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les hémopathies malignes chez l'animal.

La combinaison des éléments de preuve associés aux études épidémiologiques et expérimentales publiées entre 2010 et 2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur le risque d'hémopathies chez l'adulte, que l'exposition soit professionnelle ou environnementale (*cf.* Figure 17).

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'Homme

Figure 17 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur les hémopathies chez l'adulte (études 2010 - 2015)

L'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue d'hémopathie maligne de l'adulte.

8.3.4 Autres cas de cancer chez l'adulte

En 2002, le Circ concluait que les éléments de preuve étaient inadéquats pour conclure à la cancérogénicité des champs électromagnétiques basses fréquences en relation avec les cancers autres que la leucémie infantile, que ce soit chez l'humain ou l'animal (Circ, 2002). En 2007, l'OMS concluait que les éléments restent insuffisants pour conclure à une association entre l'exposition aux basses fréquences et la survenue de cancers autres que leucémie infantile, cancers du sein, tumeurs cérébrales et leucémie chez l'adulte (OMS, 2007). L'Afsset, en 2010, concluait, sur la base d'une revue des rapports internationaux, que « 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 » (Afsset, 2010).

La relation entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition d'autres types de cancers a été très peu étudiée durant la période 2010-2015. Une étude s'est intéressée aux mélanomes malins de la peau (Elliot *et al.*, 2013), une autre au cancer du poumon (Koeman *et al.*, 2014), et une troisième au cancer de la thyroïde (Kato *et al.*, 2015). Aucune de ces études n'a rapporté de lien entre l'exposition aux champs et l'apparition d'un cancer. Une unique étude s'est intéressée au cas du mélanome uvéal (Behrems *et al.*, 2010). L'incidence de cette tumeur rare de l'œil a été examinée dans le cadre d'une exposition professionnelle. Les auteurs ont rapporté une augmentation significative de la fréquence de cette tumeur chez les femmes travaillant sur les installations de transport d'électricité. Cette étude présentant des limites méthodologiques, ces résultats devront être confirmés.

Par conséquent, les éléments de preuve apportées par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** des basses fréquences sur le cancer de la peau, du poumon, de la thyroïde et de l'uvée.

Des études *in vitro* ont utilisé différents modèles cellulaires pour appréhender le stress génotoxique après exposition aux champs. Ainsi, Jin *et al.* (2012, 2014) et Yoon *et al.* (2014) ont utilisé une lignée épithéliale de poumon et n'ont pu détecter des cassures à l'ADN que pour des expositions dépassant le millitesla. Ces études, associées aux autres études expérimentales *in vivo* et *in vitro* reliées de façon indirecte à la cancérisation, **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer de la peau, du poumon, de la thyroïde et de l'uvée.**

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition du cancer de la peau, des poumons, de la thyroïde et du mélanome de l'uvée** (cf. Figure 17).

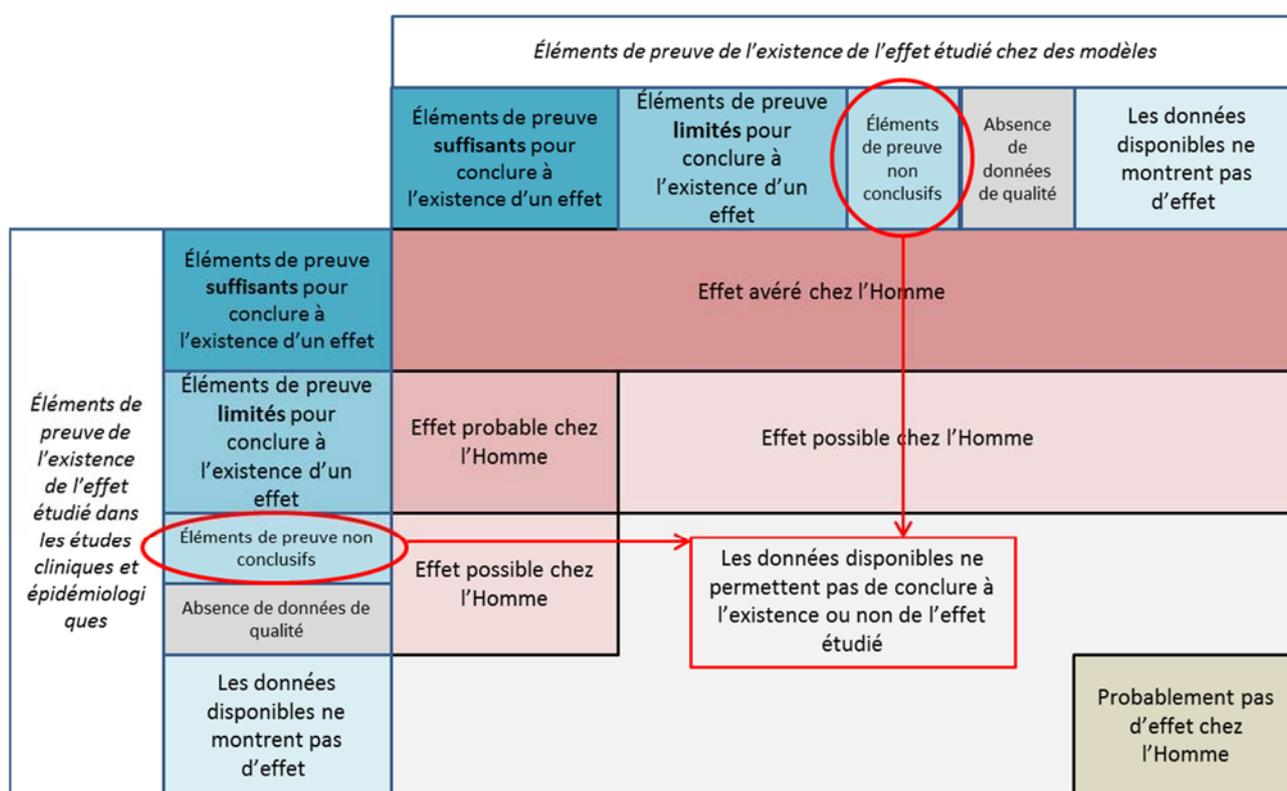


Figure 18 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur le cancer de la peau, des poumons et de la thyroïde et sur le mélanome de l'uvée (études 2010 - 2015)

L'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition du cancer de la peau, des poumons, de la thyroïde et du mélanome de l'uvée chez l'adulte.

8.4 Synthèse et niveau de preuve concernant l'effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur les maladies neurodégénératives

Concernant les maladies neurodégénératives, l'appréciation du niveau de preuve a été réalisée en différenciant les pathologies étudiées. De plus, concernant spécifiquement la sclérose latérale

amyotrophique (SLA), les études ont été analysées séparément en fonction du mode d'exposition aux champs (résidentiel ou professionnel).

8.4.1 Sclérose latérale amyotrophique

Comme souligné par le rapport de l'OMS publié en 2007, des études antérieures ont rapporté une sur-incidence des SLA dans certaines professions en lien avec l'électricité. Néanmoins, les chocs électriques étant un facteur de risque suspecté pour la SLA, la question du rôle spécifique des champs demeure encore mal connue (OMS, 2007). En conséquence, l'OMS, en 2007, a considéré que le niveau de preuve était encore insuffisant. Ce risque spécifique n'avait pas été évalué dans le cadre de l'expertise publiée par l'Afsset en 2010 (Afsset, 2010).

8.4.1.1 Exposition professionnelle

L'étude d'un lien entre la sclérose latérale amyotrophique et l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences a fait l'objet d'un nombre relativement conséquent de publications depuis 2010 (Parlett *et al.*, 2011 ; Zhou *et al.* 2012, Vergara *et al.* 2013, Sorahan et Mohammed 2014, Huss *et al.* 2015a, Fischer *et al.* 2015, Vergara *et al.* 2015).

Quelques études menées depuis 2010 rapportent une augmentation du risque de SLA chez les personnes exposées de façon professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences, ou aux chocs électriques (Huss *et al.*, 2015a ; Fischer *et al.*, 2015). L'étude de Huss *et al.* (2015a) ne rapporte pas d'augmentation de la mortalité par SLA pour les travailleurs déclarant une profession en lien avec les champs basses fréquences lors de l'un des deux recensements de la population Suisse de 1990 et de 2000. Néanmoins, dans la sous-population de travailleurs ayant exercé une profession en lien avec les champs au moment des deux recensements, les auteurs rapportent une augmentation significative de la mortalité en lien avec la SLA, évoquant ainsi l'effet d'une exposition prolongée. De même, si l'étude de Fischer *et al.* (2015) ne rapporte pas d'effet global des champs basses fréquences sur l'apparition de la SLA, cette étude montre une sur-incidence chez les soudeurs de moins de 65 ans. En revanche, d'autres études (Parlett *et al.*, 2011 ; Sorahan et Mohammed, 2014) ne rapportaient pas de lien entre l'exposition aux champs basses fréquences et l'incidence des SLA.

Toutes ces études ont utilisé, comme marqueur d'exposition, soit l'intitulé de l'emploi, soit des matrices emploi-exposition qui définissent une exposition moyenne. Ces méthodes sont contestées, car l'intitulé de l'emploi ne reflète pas de façon correcte l'exposition aux champs électromagnétiques. Par exemple, les ingénieurs de stations électriques, profession potentiellement considérée comme étant particulièrement exposée dans une matrice emploi exposition, le seraient réellement s'ils travaillaient effectivement à proximité des jeux de barre, ce qui n'est pas souvent le cas (Greenland *et al.*, 2015 ; Swanson, 2017).

De plus, les chocs électriques sont également un facteur de risque suspecté pour la SLA. Or, il est difficile dans ces études de faire la part de l'éventuelle sur-incidence provenant de l'exposition aux chocs électriques de celle provenant des champs magnétiques. Les études de Vergara *et al.* (2015) et de Fischer *et al.* (2015), qui ont cherché la part du rôle des chocs électriques dans la relation entre l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences et la SLA, ne sont pas en faveur d'une relation causale.

Par ailleurs, les deux méta-analyses (Vergara *et al.*, 2013 et Zhou *et al.*, 2012), portant sur des études antérieures à 2012, ont rapporté une augmentation significative du nombre de cas de SLA chez les travailleurs exposés aux champs basses fréquences. Leurs résultats sont néanmoins à considérer avec précaution, car ils sont tous les deux affectés par un important biais de publication. En effet, dans ces deux études, l'effet global rapporté est principalement la conséquence des effets importants mis en évidence dans des études portant sur des petits échantillons.

Par conséquent, en raison de la discordance entre les résultats des études, de la difficulté d'évaluer précisément l'exposition, de la difficulté d'isoler l'effet des chocs électriques dans la relation entre l'exposition aux champs et l'apparition des SLA, et des biais de publications des

méta-analyses sur le sujet, il apparaît que les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet d'une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de SLA.

Durant la période 2010-2015, une seule étude *in vivo* a étudié la possibilité d'un lien entre les champs basses fréquences et l'apparition d'une SLA. Liebl *et al.* (2015) ont utilisé des souris SOD1, modèle pour l'étude de cette pathologie. Les auteurs n'ont pas observé de lien entre l'exposition aux champs et l'apparition de la SLA.

Certaines études *in vivo* ont également analysé le stress protéotoxique sous exposition aux champs, *via* la mesure des taux de protéines chaperonnes ; ces protéines sont surexprimées lorsque l'homéostasie protéique de la cellule est perturbée. Mariucci *et al.* (2010) et Villarini *et al.* (2013) ont quantifié les ARNm et l'expression de la protéine de choc thermique HSP70 dans le cerveau de souris adultes exposées aux champs basses fréquences (100 μ T à 2 mT). Cette équipe n'a pas observé d'augmentation significative des niveaux d'ARNm ou de protéine HSP70, quels que soient la durée de l'exposition et l'intensité du champ. Dans leur étude, Liebl *et al.* (2015) ont également recherché la présence d'agrégats protéiques associés à HSP25. Aucune différence n'a été trouvée entre les groupes, avec ou sans exposition aux champs basses fréquences.

Enfin, on peut souligner que l'effet d'une exposition à des niveaux élevés de champ (au-delà de 0,1 mT) sur le stress oxydant dans le cerveau est compatible avec l'apparition de la SLA. Les connaissances accumulées sur cette pathologie indiquent un lien entre le stress oxydant et la SLA (Mattson et Simko, 2014), la mutation du gène de la SOD étant responsable de 11 % des formes familiales de SLA (Rosen *et al.*, 1993). Plusieurs études ont examiné le stress oxydant dans le cerveau de modèles murins après exposition aux champs. Toutes ont rapporté soit une augmentation des marqueurs de molécules oxydées, soit une modification de l'activité des enzymes anti-oxydantes (Akdağ *et al.*, 2010, 2013 ; Akpınar *et al.*, 2012 ; Cui *et al.*, 2012 ; Rageh *et al.*, 2012 ; Selakovic *et al.*, 2013 ; KantarGor *et al.*, 2014 ; Manikonda *et al.*, 2014).

Les résultats des études expérimentales sont cohérents et en faveur d'une augmentation du stress oxydant cérébral en lien avec l'exposition aux champs basses fréquences, mais ils ne concernent que des expositions à des niveaux élevés. De plus, bien que le lien entre le stress oxydant cérébral et la SLA se confirme, il ne suffit pas à expliquer le processus physiopathologique de la maladie, qui est vraisemblablement multicausal. La seule étude ayant analysé directement l'effet d'une exposition aux champs sur un modèle murin de SLA ne rapportait pas d'association significative.

Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur la SLA chez l'animal.

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'Homme

Figure 19 : évaluation du niveau de preuve de l'effet d'une exposition professionnelle aux champs électromagnétiques sur la sclérose latérale amyotrophique (études 2010 - 2015)

8.4.1.2 Exposition résidentielle

Durant la période 2010-2015, trois études épidémiologiques de qualité (Frei *et al.*, 2013 ; Marcilio *et al.*, 2011 ; Seelen *et al.*, 2015) ne rapportent pas d'effet d'une exposition résidentielle aux champs basses fréquences sur l'incidence de la SLA.

L'étude cas-témoins de grande ampleur de Frei *et al.* (2013), portant sur l'ensemble de la population du Danemark, a utilisé la distance aux lignes comme marqueur d'exposition. Cette étude n'a retrouvé aucune augmentation du nombre de cas de SLA à proximité des lignes HT ou THT. Cette absence de relation a été confirmée dans l'étude de Seelen *et al.* en 2015. Par conséquent, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne montrent pas d'effet** d'une exposition résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence des SLA.

Les éléments de preuve apportés par les études expérimentales **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de SLA chez l'animal (*cf.* paragraphe précédent).

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet d'une exposition résidentielle sur l'apparition de la SLA (*cf.* Figure 20).

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			Probablement pas d'effet chez l'Homme
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet		Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			

Figure 20 : évaluation du niveau de preuve de l'effet d'une exposition résidentielle aux champs électromagnétiques sur la sclérose latérale amyotrophique

8.4.1.3 Conclusion sur la SLA

L'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la sclérose latérale amyotrophique, que l'exposition soit professionnelle ou environnementale.

8.4.2 Démences

Les études concernant la maladie d'Alzheimer ayant des résultats contradictoires, l'OMS en 2007 a conclu que les éléments de preuve étaient très limités concernant l'association entre l'exposition aux champs basses fréquences et le risque de maladie d'Alzheimer (OMS, 2007). Le rapport d'expertise publié par l'Afsset en 2010 rappelait la conclusion du rapport publié par le Scenihir en 2009 « 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 ». Le Scenhir est revenu sur sa position en 2015 pour conclure que les nouvelles études épidémiologiques ne confirment pas l'hypothèse que l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences augmente le risque de survenue de la maladie d'Alzheimer.

Depuis 2010, cinq études ont été conduites sur le lien entre la maladie d'Alzheimer et l'exposition aux champs basses fréquences (Andel *et al.*, 2010 ; Vergara *et al.*, 2013 ; Sorahan et Mohammed, 2014 ; Koeman *et al.*, 2015 ; Frei *et al.*, 2013) :

- incluant vingt études portant sur le lien entre l'exposition aux champs basses fréquences et la maladie d'Alzheimer, la méta-analyse de Vergara *et al.* (2013) a rapporté une légère sur-incidence de la maladie d'Alzheimer chez les travailleurs exposés aux champs (RR = 1,27 [1,15 - 1,40]). Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec prudence, en raison d'une part de la grande variabilité méthodologique entre les études, et d'autre part de l'importance du biais de publication en faveur des résultats montrant un effet significatif. Ainsi, comme

- souligné par les auteurs, ce biais de publication pourrait expliquer en grande partie la sur-incidence de la maladie d'Alzheimer constatée dans l'étude ;
- bien que l'étude d'Andel *et al.* (2010) n'ait pas montré, de façon globale, d'augmentation significative du nombre de démences, ni plus spécifiquement d'augmentation du nombre de cas de maladie d'Alzheimer en lien avec l'exposition aux champs, dans les deux cas, les OR rapportés étaient proches du seuil de significativité. De plus, dans cette étude, un niveau moyen ou important d'exposition était associé avec une augmentation de l'incidence des démences avant l'âge de 75 ans ;
 - au sein d'une cohorte de 120 000 travailleurs aux Pays-Bas, un sur-risque de décès par démence a été mis en évidence, mais uniquement pour la catégorie d'exposition intermédiaire et sans aucune relation dose-effet. Comme souligné par les auteurs, l'absence de relation avec la dose reçue n'est pas en faveur d'une association entre l'exposition aux champs basses fréquences et le risque de démence (Koeman *et al.*, 2015) ;
 - la cohorte de plus de 70 000 travailleurs de Sorahan et Mohammed n'a pas montré de lien entre la maladie d'Alzheimer et l'exposition prolongée aux champs basses fréquences. Concernant l'exposition résidentielle aux champs, l'étude cas-témoins de Frei *et al.* (2013), portant sur l'ensemble de la population du Danemark, n'a rapporté aucun sur-risque de la maladie d'Alzheimer à proximité des lignes à HT/THT.

En raison de la discordance entre les résultats des études recensées et de l'importance du biais de publications dans la méta-analyse disponible, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne permettent pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition professionnelle ou environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de maladie d'Alzheimer.

Concernant les études expérimentales, cinq études *in vivo* ont directement investigué le rôle de l'exposition aux champs basses fréquences sur l'apparition de la maladie d'Alzheimer. Certaines ont utilisé des modèles de rats de laboratoire classiques (Akdağ *et al.*, 2013a ; Zhang *et al.*, 2015), alors que d'autres ont plutôt utilisé des modèles murins de la maladie d'Alzheimer : souris APP23 (Liebl *et al.*, 2015) ou rats traités à l'aluminium pour déclencher la dégénérescence cérébrale (Zhang *et al.*, 2013). Aucune de ces études n'a identifié de lien entre l'exposition d'intérêt et le développement de la maladie d'Alzheimer.

Ainsi, les éléments de preuve apportés par les études expérimentales pour la période 2010 - 2015 **ne montrent pas d'effet** de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de la maladie d'Alzheimer.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet des champs électromagnétiques basses fréquences sur l'apparition de la maladie d'Alzheimer.

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'Homme

Figure 21 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'émergence de la maladie d'Alzheimer

En conclusion, l'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de la maladie d'Alzheimer.

8.4.3 Maladie de Parkinson

Le lien entre la maladie de Parkinson et l'exposition aux champs basses fréquences est celui qui a le moins bénéficié d'attention en épidémiologie (OMS, 2007). Les études antérieures à 2010 sont peu nombreuses, conduisant l'OMS en 2007 à conclure qu'aucune étude n'a apporté suffisamment de preuves sur le lien entre l'exposition aux champs basses fréquences et la maladie de Parkinson. Par ailleurs, les rapports publiés par l'Afsset en 2010 ou le Scenihir en 2007 et 2009 n'ont pas fait mention spécifiquement de cette pathologie.

Les études épidémiologiques conduites depuis 2010 (Soharan et Mohammed, 2014 ; Huss *et al.*, 2015b ; Brouwer *et al.*, 2015 ; Van der Mark *et al.*, 2015) ne mettent pas en évidence d'association entre la survenue de la maladie de Parkinson et l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences. Parmi ces études, la méta-analyse de Huss *et al.*, en 2015b, a inclus 11 études publiées (y compris les 3 précédemment citées). Cette méta-analyse, qui n'est pas affectée par un biais de publication, n'a pas rapporté de sur-incidence de la maladie de Parkinson pour les travailleurs exposés aux champs basses fréquences.

Enfin, concernant l'exposition résidentielle, l'étude de Frei *et al.* (2013) portant sur l'ensemble de la population du Danemark n'a rapporté aucun sur-risque de la maladie de Parkinson à proximité des lignes à HT/THT.

Compte tenu de la qualité des études et de la concordance de leurs résultats, les éléments de preuve apportés par les études épidémiologiques disponibles pour la période 2010-2015 **ne montrent pas d'effet** de l'exposition professionnelle ou résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la maladie de Parkinson.

Sur l'animal, les données sont **inexistantes** pour la période 2010-2015.

La combinaison des éléments de preuve issus des études épidémiologiques et des études expérimentales pour la période 2010-2015 **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet de l'exposition professionnelle ou environnementale aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'incidence de la maladie de Parkinson.

		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré chez l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable chez l'Homme	Effet possible chez l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible chez l'Homme				
	Absence de données de qualité		Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					Probablement pas d'effet chez l'Homme

Figure 22 : évaluation globale de l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences sur l'émergence de la maladie de Parkinson

L'ensemble des données disponibles **ne permet pas de conclure à l'existence ou non** d'un effet d'une exposition professionnelle ou résidentielle aux champs électromagnétiques basses fréquences sur la survenue de la maladie de Parkinson.

Tableau 35 : classement des éléments de preuves et du niveau de preuve pour chaque effet étudié

Effet étudié		Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié dans les études humaines cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié sur des modèles animaux	Classement du niveau de preuve de l'effet
Chez l'enfant				
Leucémie infantile		Les éléments de preuve sont limités pour conclure à l'existence d'un effet des champs basses fréquences sur la leucémie infantile.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles permettent de conclure à un effet possible des champs basses fréquences sur la leucémie infantile.
Tumeurs du système nerveux central chez l'enfant		Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur les tumeurs du système nerveux central chez l'enfant.
Chez l'adulte				
Cancer du sein		Les éléments de preuve disponibles ne montrent pas d'effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur le cancer du sein.
Tumeurs du système nerveux central	exposition professionnelle	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur les tumeurs du système nerveux central chez l'adulte, que l'exposition soit résidentielle ou professionnelle.

Effet étudié		Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié dans les études humaines cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié sur des modèles animaux	Classement du niveau de preuve de l'effet
chez l'adulte	exposition résidentielle	Les données disponibles ne montrent pas d'effet des champs basses fréquences sur les tumeurs du système nerveux central	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	
Hémopathies malignes		Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur les hémopathies malignes.
Sclérose latérale amyotrophique	exposition professionnelle	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences sur la sclérose latérale amyotrophique.
	exposition résidentielle	Les données disponibles ne montrent pas d'effet d'une exposition résidentielle aux champs basses fréquences	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de l'exposition résidentielle aux champs basses fréquences sur la sclérose latérale amyotrophique.
Maladie d'Alzheimer		Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur la maladie d'Alzheimer.

Effet étudié	Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié dans les études humaines cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve concernant l'existence de l'effet étudié sur des modèles animaux	Classement du niveau de preuve de l'effet
Maladie de Parkinson	Les données disponibles ne montrent pas d'effet des champs basses fréquences sur la maladie de Parkinson	Absence de donnée de qualité.	L'ensemble des données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs basses fréquences sur la maladie de Parkinson.

9 Conclusions du groupe de travail

Ce rapport d'expertise analyse l'ensemble des connaissances disponibles relatives à :

- l'exposition du public et des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences (gamme de fréquences se situant entre 0 Hz exclu et quelques kilohertz) ;
- les effets éventuels de ces champs sur l'Homme ou sur des modèles animaux et/ou cellulaires.

Depuis le rapport publié par l'Afsset en 2010, qui mettait en évidence une amélioration générale de l'approche globale de l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, de nombreuses études ont été menées, donnant aujourd'hui une vision mieux détaillée de l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à laquelle sont soumis la population générale et les travailleurs. Ainsi, l'exposition de la population générale est, dans l'immense majorité des cas, largement inférieure aux valeurs limites d'exposition réglementaires. En effet, les études menées dans l'environnement extérieur, par exemple dans les espaces publics en milieu urbain, montrent que l'intensité des champs magnétiques basse fréquence varie entre 0,05 et 0,2 μT . Les niveaux d'exposition peuvent toutefois être un peu plus élevés dans les transports en commun (quelques microteslas). Ces valeurs faibles dominent largement dans l'environnement, où l'on peut toutefois rencontrer exceptionnellement des valeurs plus élevées, de l'ordre de quelques μT ($\approx 4 \mu\text{T}$), observées notamment directement sous des lignes de transport d'électricité à très haute tension, à proximité immédiate des locaux des transformateurs ou encore des sous-stations. L'étude originale menée dans le cadre de cette expertise a révélé qu'en France, environ 0,35 % (environ 40 000 personnes) des enfants de moins de 15 ans et 0,28 % (environ 203 000 personnes) de la population générale, sont potentiellement exposés à un champ magnétique basse fréquence supérieur à 0,4 μT , lié aux lignes à haute tension. Dans l'environnement intérieur des habitations, des valeurs élevées de champs (jusqu'au mT) peuvent être mesurées, produites par différents appareils domestiques, dont certains sont utilisés très près du corps, comme par exemple les sèche-cheveux. L'exposition à ces appareils est néanmoins la plupart du temps brève et localisée. Dans le cadre professionnel, cette expertise a mis en lumière que des niveaux d'exposition peuvent être, dans des situations bien spécifiques, bien supérieurs aux valeurs limites réglementaires déclenchant l'action (1 mT à 50 Hz). Ces situations particulières requièrent une analyse au cas par cas de l'environnement électromagnétique du poste de travail pour mettre en place des mesures de réduction de l'exposition par l'éloignement des sources et la réduction des temps d'exposition, tel que préconisé dans la réglementation.

Concernant les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, l'analyse des nombreuses études publiées lors de la période 2010-2015 est en cohérence avec les conclusions du rapport publié par l'Afsset en 2010. Il est important de souligner que les résultats des études épidémiologiques ne sont pas corroborés par ceux des études mécanistiques. Ce constat, qui avait été fait au début des années 2000, reste encore valable aujourd'hui. Cependant, si précédemment les classifications des niveaux de risque reposaient essentiellement sur les résultats des études épidémiologiques, la méthodologie d'évaluation du niveau de preuve déployée pour cette expertise permet également de prendre en compte les résultats des études mécanistiques. Par ailleurs, cette expertise analyse le niveau de preuve en se penchant individuellement sur chaque pathologie. Elle a fait le point sur l'ensemble des connaissances, notamment sur les effets sanitaires suivants :

- s'agissant de la leucémie infantile, l'ensemble des données considérées (au travers d'autres rapports antérieurs à 2010 et par l'analyse de la bibliographie récente) permet de conclure à un effet possible des champs basses fréquences sur l'apparition de cette pathologie. Il faut souligner que cette conclusion est davantage basée sur les résultats des études antérieures à 2010 que sur les résultats des études récentes, qui retrouvent moins fréquemment le lien mis en évidence précédemment ;

- s'agissant du cancer du sein, l'association mise en évidence par l'étude d'Erren en 2001 n'a pas été confirmée par les études menées ultérieurement. Les rapports d'expertise disponibles s'accordent sur l'absence de lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et cette pathologie, et l'analyse des études épidémiologiques publiées entre 2010 et 2015 rejoint cette conclusion. Ainsi, l'ensemble des données ne permet pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs magnétiques sur le cancer du sein ;
- concernant les tumeurs cérébrales, deux études suggèrent la possibilité d'un lien entre l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de gliome ou de méningiome, et deux études ne retrouvent pas de lien. À l'heure actuelle, les données sont trop hétérogènes pour conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et d'autres études sont nécessaires dans ce domaine ;
- concernant la sclérose latérale amyotrophique, malgré les limites relevées au cours de leur analyse, certaines études font apparaître un lien entre la SLA et le fait d'exercer un emploi en lien avec l'électricité. Ce lien pourrait être expliqué par différents facteurs d'exposition : champ magnétique, choc électrique ou encore synergie entre agent physique et chimique, etc. Même si les données actuelles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un lien entre l'exposition aux basses fréquences et la SLA, la poursuite d'étude dans ce domaine est une priorité ;
- pour les autres pathologies (autres cancers de l'enfant et de l'adulte, autres maladies dégénératives), les données sont trop parcellaires pour conclure à l'existence ou non d'un lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences.

Par ailleurs, certaines études cliniques et expérimentales mettent en évidence une possible interférence entre l'exposition à des champs magnétiques à des niveaux faibles (de l'ordre du microtesla) et l'activité électrique cérébrale. Ces résultats ne peuvent pas à ce jour être reliés à un processus physiopathologique, et doivent être confortés par d'autres études. Cependant, de façon intéressante, on peut noter une certaine similitude avec les conclusions de l'expertise publiée par l'Anses en 2013 « radiofréquences et santé », qui notait « une modification de l'activité électrique cérébrale (notamment de la puissance du rythme alpha) » après exposition aux radiofréquences.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 20 février 2018

10 Recommandations du groupe de travail

10.1 Recommandations en matière d'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences

Concernant la métrologie

La traçabilité et la fiabilité des mesures des champs électromagnétiques basses fréquences restant un enjeu très important dans l'évaluation de l'exposition, le groupe de travail reprend la recommandation exprimée en 2010 par l'Afsset, 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.

Le groupe de travail recommande également que les demandes de mesures d'exposition formulées par les services publics (préfectures, mairies, etc.) soient confiées à des acteurs pouvant démontrer des capacités techniques certaines pour réaliser ces mesures, comme par exemple à travers une accréditation de type Cofrac.

Concernant l'exposition du public :

Considérant ;

- le développement de nouvelles sources d'expositions liées à la production décentralisée de l'énergie, avec des sources de production de plus en plus près du consommateur ;
- le développement important de nouvelles technologies consommatrices d'énergie (par exemple *data centers*) impliquant de nouvelles sources d'exposition ou leur concentration ;
- le manque de données sur certaines sources d'expositions déjà identifiées (voitures, transports public, transformateurs...);
- la multiplicité des sources d'exposition du public, notamment en milieu urbain (lignes enterrées, signalisation, transport collectif, etc.) ;
- que les résultats de certaines études épidémiologiques (dont Géocap) montrent une association avec la leucémie chez les enfants vivant à moins de 50 m de lignes THT dont la tension est supérieure à 225 kV,

le groupe de travail recommande :

- de mesurer l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences à moins de 50 m de lignes THT ainsi que d'autres facteurs que les champs électromagnétiques (pollution, substances chimiques, bruit, etc.) ;
- de mieux caractériser l'exposition spécifiquement due aux postes de transformation électrique, notamment ceux situés près des lieux recevant du public, des habitations ou des lieux de travail ;
- d'évaluer de façon globale l'exposition aux niveaux de champs auxquels sont exposés les habitants en milieu urbain, qui concentre une diversité de sources de champs électromagnétiques basses fréquences (ligne de transport aériennes et enterrées, transports collectifs, postes de transformation, etc.) ;
- d'évaluer, en amont de la mise en place d'une nouvelle technologie, l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences des futurs utilisateurs.

Le groupe de travail recommande également de faciliter, pour les particuliers, les demandes de caractérisation de leur environnement électromagnétique par un laboratoire accrédité. Il s'agirait, par exemple, d'étendre aux basses fréquences « le dispositif national de mesure des champs électromagnétiques » de l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

Concernant l'exposition des travailleurs :

Considérant les niveaux de champs très différents et parfois très élevés auxquels les travailleurs peuvent être soumis selon leur métier, le groupe de travail souligne toute la pertinence de la Directive européenne 2013/35/UE imposant à l'employeur de caractériser l'environnement électromagnétique des postes de travail. Le groupe de travail souligne également l'intérêt de l'action coordonnée INRS/Carsat/Cramif visant à recenser les équipements industriels les plus exposants et à en mesurer les niveaux d'exposition.

Cependant, considérant les niveaux de champ magnétique très élevés auxquels certaines populations de travailleurs sont exposées, et compte-tenu des incertitudes au sujet d'un lien entre l'exposition aux champs et la survenue de certains effets sanitaires chez les travailleurs exposés de façon chronique à des hauts niveaux de champs basses fréquences, le groupe de travail recommande :

- que les constructeurs de machines industrielles émettant des champs électromagnétiques basses fréquences (*a minima* celles faisant partie des 7 catégories les plus exposantes mises en évidence par l'INRS, cf Figure 8) mesurent l'exposition émise par leur appareils dans des conditions nominales de fonctionnement et l'affichent sur la fiche technique de la machine ;
- qu'un recueil de l'exposition professionnelle soit mis en place dans le suivi médical du personnel, tout le long de sa carrière, de façon inter-entreprise, de manière à permettre un suivi longitudinal de l'exposition professionnelle.

Par ailleurs, certaines études ont montré que la densité de courant induite dans le corps entier du fœtus s'accroît avec le stade de la grossesse. Par conséquent, le respect des valeurs limites d'exposition professionnelles ne permet pas d'assurer le respect des valeurs limites d'exposition pour la population générale pour le fœtus à partir du deuxième trimestre de grossesse. Le groupe de travail souligne l'importance de l'article R. 4152-7-1⁷⁰ du Code du travail et recommande à l'employeur de sensibiliser les femmes aux risques éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences pendant la grossesse.

En matière de réglementation

Considérant ;

- que les expérimentations *in vivo* et *in vitro* ont mis en évidence la possibilité d'effets biologiques liés à l'exposition au champ électromagnétique basses fréquences qui pourraient avoir des conséquences indirectes sur l'apparition d'une pathologie ;
- que ces effets biologiques apparaissent à des niveaux de champ autour du militesla ;
- que certaines catégories de travailleurs sont exposés à de tels niveaux de champ magnétique ;
- le résultat des études épidémiologiques mettant en évidence des effets possibles des champs électromagnétiques basses fréquences sur certaines pathologies pour une exposition professionnelle ;

Le groupe de travail recommande qu'une prochaine réévaluation des valeurs limites d'exposition prenne en compte tous les éléments scientifiques à disposition, incluant les études épidémiologiques, les études *in vivo* et *in vitro* portant sur les effets biologiques.

⁷⁰ « Art. R. 4152-7-1. - Lorsque, dans son emploi, la femme enceinte est exposée à des champs électromagnétiques, son exposition est maintenue à un niveau aussi faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en tenant compte des recommandations de bonnes pratiques existantes, et en tout état de cause à un niveau inférieur aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques ».

En matière d'urbanisme

Compte-tenu de la potentielle sur-incidence de leucémies infantiles à proximité des lignes à haute tension, et malgré l'absence de preuve d'un lien de causalité direct entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de leucémie infantile, le groupe de travail souligne la pertinence, par précaution, d'éviter, dans la mesure du possible, de décider ou d'autoriser l'implantation de nouveaux établissements sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, maternelles, écoles primaires etc.) à moins de 50 m de part et d'autre des lignes de transport d'électricité à très haute tension supérieure à 225 kV.

10.2 Recommandations en matière d'études et de recherches sur les effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques basses fréquences

10.2.1 Exposition

Considérant

- les résultats des études dosimétriques qui mettent en évidence un possible dépassement des restrictions de base chez le fœtus dans certains scénarios, lorsque la mère est exposée à un champ magnétique à 50 Hz, le groupe de travail recommande de poursuivre des études de modélisation de l'exposition au cours de la grossesse ;
- les résultats de l'étude de Liorni *et al.*, (2015a et 2015b) qui mettent en évidence un possible dépassement des restrictions de base dans les tissus du système nerveux central chez le fœtus, quand la mère est exposée à la valeur d'action haute, le groupe de travail recommande de poursuivre des études de modélisation de l'exposition au cours de la grossesse.

10.2.2 Épidémiologie

10.2.2.1 Population

Considérant :

- que l'association entre l'exposition aux champs basses fréquences et l'apparition de leucémie infantile est mise en évidence uniquement dans les études épidémiologiques ayant qualifié l'exposition aux champs électromagnétiques par la distance aux lignes ;
- que cette association n'a pas été retrouvée dans les études épidémiologiques qui estimaient l'exposition par modélisation ou à l'aide de mesures de champ magnétique ;
- le manque de constance de cette association, notamment dans des cohortes récentes ;
- l'absence de mécanisme d'action biologique identifié pouvant expliquer l'association épidémiologique ;
- que l'association, si elle existe, est faible,

le groupe de travail recommande ;

- de privilégier les analyses poolées, notamment pour les études basées sur des mesures directes de champs ;
- d'encourager la recherche en épidémiologie sur les effets de l'exposition des champs électromagnétiques basses fréquences en association avec d'autres facteurs (comme par exemple les polluants émis par le trafic routier) ou la prise en compte de facteurs de confusions liés aux champs électromagnétiques ;

- d'encourager la publication de résultats négatifs, car ils sont importants à prendre en compte, particulièrement dans les analyses poolées.

Considérant ;

- que le nombre de sujets hautement exposés aux champs électromagnétique basses fréquences est faible, induisant une faible puissance des études épidémiologiques ;
- que l'association entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de pathologies, si elle existe, est faible,

le groupe de travail recommande d'étudier des populations exposées ou potentiellement exposées à des niveaux élevés de basses fréquences, telles que certaines catégories de professionnels ou les personnes habitants à proximité des postes de transformation (cf. étude Transexpo).

Le groupe de travail recommande la poursuite du recueil des adresses précises des sujets dans les registres de pathologie et leur géolocalisation, pour permettre d'étudier les effets sanitaires liés à des expositions environnementales.

10.2.2.2 Travailleurs

Considérant ;

- les résultats de certaines études épidémiologiques suggérant un effet possible des basses fréquences sur la survenue de SLA chez les travailleurs exposés de façon chronique ;
- le manque de données sur l'exposition chronique des travailleurs aux champs électromagnétiques basses fréquences ;

le groupe de travail recommande ;

- l'enregistrement systématique et continu des cas de SLA afin d'encourager la recherche grâce à un registre de population documentant notamment l'histoire professionnelle, (comme le registre irlandais des maladies du neurone moteur) ;
- de poursuivre la réalisation d'études épidémiologiques en milieu professionnel.

Considérant également ;

- les résultats non homogènes concernant l'apparition de maladie d'Alzheimer ;
- l'association observée dans deux études entre une exposition professionnelle aux basses fréquences et l'apparition de démences dans certaines sous-catégories de travailleurs (démence précoces ou uniquement chez les hommes) ;
- que cette association était plus significative chez les travailleurs ayant subi des chocs électriques ;
- que certains troubles cognitifs ont été retrouvés chez des animaux exposés aux champs électromagnétiques basses fréquences,

le groupe de travail recommande :

- l'étude d'autres types de démences que la maladie d'Alzheimer ;
- d'évaluer la part relative du risque pour les travailleurs liée à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences de celle liée aux chocs électriques potentiellement subis.

Compte tenu des résultats non homogènes sur le lien entre une exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et l'apparition de gliomes et de méningiomes, le groupe de travail recommande la poursuite des études épidémiologiques, en particulier chez les travailleurs.

Des études de cohortes prospectives, comprenant des mesures d'exposition sur le lieu de travail devraient être privilégiées.

Considérant ;

- l'étude unique d'envergure ayant rapporté un lien entre l'exposition professionnelle aux champs basses fréquences et la survenue de mélanome oculaire ;
- l'absence de prise en compte de certains facteurs de confusion et le mode de recueil des données imprécis de cette étude,

le groupe de travail recommande de mener une étude internationale et/ou une étude poolée afin de confirmer ou d'infirmer ce résultat.

D'un point de vue général, le groupe de travail recommande vivement la constitution de cohortes de travailleurs exposés ou non exposés, ou la pérennisation de cohortes existantes, pour étudier le lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences et la survenue de pathologies.

10.2.3 Effets biologiques

Recherches sur la leucémie infantile

Considérant les incertitudes scientifiques persistantes concernant la relation entre l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences et l'augmentation du risque de leucémies infantiles,

le groupe de travail recommande :

- d'encourager l'utilisation de modèles animaux de leucémie lymphoblastique aiguë, notamment par la mise au point des modèles murins de leucémie infantile utilisables dans les études sur les champs basses fréquences ;
- d'étudier l'implication possible d'un facteur tiers dont la toxicité est établie (agents génotoxiques, co-cancérogène, etc.) dans l'optique de comprendre expérimentalement la relation entre champs magnétiques basses fréquences et leucémies de l'enfant.

Recherches sur la SLA

Considérant ;

- la mise en évidence, par quelques études épidémiologiques, d'une association entre SLA et exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences chez les travailleurs ;
- la mise en évidence de certains effets biologiques (stress oxydant) à des niveaux d'exposition de l'ordre du millitesla, niveau rencontré chez certains travailleurs ;
- que ces effets biologiques retrouvés concernent principalement le stress oxydant, et qu'un modèle murin de SLA existant est justement un modèle avec une SOD mutée, enzyme impliquée dans la balance oxydative,

le groupe de travail recommande en priorité de poursuivre la recherche sur la SLA, notamment avec des modèles murins spécifiques de cette pathologie.

Recherches sur le fonctionnement cérébral, la cognition et la mémoire, et l'activité électrique cérébrale (EEG)

Considérant :

- la mise en évidence de modifications des capacités de mémoire et des niveaux d'anxiété et d'émotion chez l'animal dans certaines études ;

- la perturbation des potentiels évoqués (signaux EEG de très faible intensité) en réponse à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences en étude clinique ou chez l'animal ;
- certaines études mettant en évidence une modification de la plasticité cérébrale et de la neurogenèse ;

le groupe de travail recommande de poursuivre la recherche dans ces domaines, de confirmer ces résultats, et d'approfondir les connaissances sur les mécanismes biologiques impliqués ;

Considérant que les études toxicologiques sont menées sur des périodes d'exposition courtes, alors que la population ou les travailleurs sont généralement exposés à long terme aux champs électromagnétiques basses fréquences, le groupe de travail recommande de développer un indicateur d'exposition de doses cumulées et de réaliser des études vie entière.

11 Bibliographie

11.1 Publications

- Afsset 2010. Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, Maisons-Alfort, Afsset. 170 p.
- Ahlbom, A., N. Day, M. Feychting, E. Roman, J. Skinner, J. Dockerty, M. Linet, M. McBride, J. Michaelis, J. H. Olsen, T. Tynes, et P. K. Verkasalo. 2000. "A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia." *British Journal of Cancer* 83 (5):692-698. doi: 10.1054/bjoc.2000.1376.
- Akdağ, M. Z., S. Dasdag, E. Ulukaya, A. K. Uzunlar, M. A. Kurt, et A. Taşkın. 2010a. "Effects of extremely low-frequency magnetic field on caspase activities and oxidative stress values in rat brain." *Biological Trace Element Research* 138 (1-3):238-249. doi: 10.1007/s12011-010-8615-3.
- Akdağ, M. Z., S. Dasdag, N. Erdal, H. Buyukbayram, et S. Gurgul. 2010b. "The effect of long-term extremely low-frequency magnetic field on geometric and biomechanical properties of rats' bone." *Electromagnetic Biology and Medicine* 29 (1-2):9-18.
- Akdağ, Mehmet Zulkuf, Suleyman Dasdag, Dilek Ulker Cakir, Beran Yokus, Goksel Kizil, et Murat Kizil. 2013a. "Do 100- and 500- μ T ELF magnetic fields alter beta-amyloid protein, protein carbonyl and malondialdehyde in rat brains?" *Electromagnetic Biology and Medicine*. doi: 10.3109/15368378.2012.721848.
- Akdağ, Mehmet Zulkuf, Suleyman Dasdag, Ali Kemal Uzunlar, Engin Ulukaya, Arzu Yilmaztepe Oral, Necla Celik, et Feyzan Akşen. 2013b. "Can safe and long-term exposure to extremely low frequency (50 Hz) magnetic fields affect apoptosis, reproduction, and oxidative stress?" *International Journal of Radiation Biology*. doi: 10.3109/09553002.2013.817705.
- Akdağ, Mehmet, Mehmet Zülküf Akdağ, Süleyman Daşdağ, et Özcan Erel. 2014. "Oxidative and antioxidative responses in submandibular and parotis glands of rats exposed to long-term extremely low frequency magnetic field." *Journal of Clinical and Experimental Investigations* 5 (2). doi: 10.5799/ahinjs.01.2014.02.0392.
- Akpinar, Deniz, Nihal Ozturk, Sukru Ozen, Aysel Agar, et Piraye Yargicoglu. 2012. "The effect of different strengths of extremely low-frequency electric fields on antioxidant status, lipid peroxidation, and visual evoked potentials." *Electromagnetic Biology and Medicine* 31 (4):436-448. doi: 10.3109/15368378.2012.692342.
- Alcaraz, Miguel, Encarnación Olmos, Miguel Alcaraz-Saura, Daniel G. Achel, et Julián Castillo. 2014. "Effect of long-term 50 Hz magnetic field exposure on the micronucleated polychromatic erythrocytes of mice." *Electromagnetic Biology and Medicine* 33 (1):51-57. doi: 10.3109/15368378.2013.783851.
- Alonso, A., A. Bahillo, R. de la Rosa, A. Carrera, R. J. Durán, et P. Fernández. 2012. "Measurement procedure to assess exposure to extremely low-frequency fields: A primary school case study." *Radiation Protection Dosimetry* 151 (3):426-436.
- Alsaeed, Ibrahim, Faisal Al-Somali, Lama Sakhnini, Omar S. Aljarallah, Rayan M. M. Hamdan, Saleh A. Bubishate, Ziyab Khan Sarfaraz, et Amer Kamal. 2014. "Autism-relevant social abnormalities in mice exposed perinatally to extremely low frequency electromagnetic fields." *International Journal of Developmental Neuroscience: The Official Journal of the International Society for Developmental Neuroscience* 37:58-64. doi: 10.1016/j.ijdevneu.2014.06.010.
- Amirifalah, Zeinab, S. Mohammad P. Firoozabadi, et S. Ali Shafiei. 2013. "Local exposure of brain central areas to a pulsed ELF magnetic field for a purposeful change in EEG." *Clinical EEG*

- and neuroscience: official journal of the EEG and Clinical Neuroscience Society (ENCS) 44 (1):44-52. doi: 10.1177/1550059412460164.
- Andel, Ross, Michael Crowe, Maria Feychting, Nancy L. Pedersen, Laura Fratiglioni, Boo Johansson, et Margaret Gatz. 2010. "Work-Related Exposure to Extremely Low-Frequency Magnetic Fields and Dementia: Results from the Population-Based Study of Dementia in Swedish Twins." *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences* 65A (11):1220-1227. doi: 10.1093/gerona/g112.
- Anses. 2013. "Radiofréquences et santé : mise à jour de l'expertise." Avis et rapport de l'Anses. Maisons-Alfort: Anses. 428 p.
- Anses. 2015. "Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques." Avis et rapport de l'Anses. Maisons-Alfort: Anses. 153 p.
- Anses. 2016. "Exposition aux radiofréquences et santé des enfants." Avis et rapport de l'Anses. Maisons-Alfort: Anses. 298 p.
- Anses. 2017. "Exposition de la population aux champs électromagnétiques émis par les "compteurs communicants"." Avis et rapport de l'Anses Maisons-Alfort: Anses. 146 p.
- Anses. 2018. "Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques." Avis et rapport de l'Anses. Maisons-Alfort: Anses. 382 p.
- Arias-Carrión, O., L. Verdugo-Díaz, A. Feria-Velasco, D. Millán-Aldaco, A. A. Gutiérrez, A. Hernández-Cruz, et R. Drucker-Colín. 2004. "Neurogenesis in the subventricular zone following transcranial magnetic field stimulation and nigrostriatal lesions." *Journal of Neuroscience Research* 78 (1):16-28. doi: 10.1002/jnr.20235.
- Bailey, Helen D., Claire Infante-Rivard, Catherine Metayer, Jacqueline Clavel, Tracy Lightfoot, Peter Kaatsch, Eve Roman, Corrado Magnani, Logan G. Spector, Eleni Th Petridou, Elizabeth Milne, John D. Dockerty, Lucia Miligi, Bruce K. Armstrong, Jérémie Rudant, Lin Fritschi, Jill Simpson, Luoping Zhang, Roberto Rondelli, Margarita Baka, Laurent Orsi, Maria Moschovi, Alice Y. Kang, et Joachim Schüz. 2015. "Home pesticide exposures and risk of childhood leukemia: Findings from the childhood leukemia international consortium." *International Journal of Cancer* 137 (11):2644-2663. doi: 10.1002/ijc.29631.
- Balamuralikrishnan, B., V. Balachandar, S. S. Kumar, N. Stalin, P. Varsha, S. M. Devi, M. Arun, P. Manikantan, C. Venkatesan, K. Sasikala, et S. N. Dharwadkar. 2012. "Evaluation of chromosomal alteration in electrical workers occupationally exposed to low frequency of electro magnetic field (EMFs) in coimbatore population, India." *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention* 13 (6):2961-2966.
- Balassa, T., R. Szemerszky, et Gy Bárdos. 2009. "Effect of short-term 50 Hz electromagnetic field exposure on the behavior of rats." *Acta physiologica Hungarica* 96 (4):437-448. doi: 10.1556/APhysiol.96.2009.4.4.
- Balassa, Tímea, Petra Varró, Szilvia Elek, Orsolya Drozdovszky, Renáta Szemerszky, Ildikó Világi, et György Bárdos. 2013. "Changes in synaptic efficacy in rat brain slices following extremely low-frequency magnetic field exposure at embryonic and early postnatal age." *International Journal of Developmental Neuroscience: The Official Journal of the International Society for Developmental Neuroscience* 31 (8):724-730. doi: 10.1016/j.ijdevneu.2013.08.004.
- Baldi, Isabelle, Gaëlle Coureau, Anne Jaffré, Anne Gruber, Stéphane Ducamp, Dorothée Provost, Pierre Lebailly, Anne Vital, Hugues Loiseau, et Roger Salamon. 2011. "Occupational and residential exposure to electromagnetic fields and risk of brain tumors in adults: A case-control study in Gironde, France." *International Journal of Cancer* 129 (6):1477-1484. doi: 10.1002/ijc.25765.

- Behrens, Thomas, Claudia Terschüren, William T. Kaune, et Wolfgang Hoffmann. 2004. "Quantification of lifetime accumulated ELF-EMF exposure from household appliances in the context of a retrospective epidemiological case-control study." *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 14 (2):144-153. doi: 10.1038/sj.jea.7500305.
- Behrens, Thomas, Elsebeth Lynge, Ian Cree, Svend Sabroe, Jean-Michel Lutz, Noemia Afonso, Mikael Eriksson, Pascal Guénel, Franco Merletti, Maria Morales-Suarez-Varela, et others. 2010. "Occupational exposure to electromagnetic fields and sex-differential risk of uveal melanoma." *Occupational and Environmental Medicine*:oem-2009.
- Belova, N. A., O. N. Ermakova, A. M. Ermakov, Z. Ye Rojdestvenskaya, et V. V. Lednev. 2007. "The bioeffects of extremely weak power-frequency alternating magnetic fields." *The Environmentalist* 27 (4):411-416. doi: 10.1007/s10669-007-9076-x.
- Bessou, Jérôme, François Deschamps, Lionel Figueroa, et Damien Cougnaud. 2013. "Methods used to estimate residential exposure to 50 Hz magnetic fields from overhead power lines in an epidemiological study in France." *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection* 33 (2):349-365. doi: 10.1088/0952-4746/33/2/349.
- Bonassi, S., A. Abbondandolo, L. Camurri, L. Dal Pra, M. De Ferrari, F. Degrassi, A. Forni, L. Lamberti, C. Lando, P. Padovani, et et al. 1995. "Are chromosome aberrations in circulating lymphocytes predictive of future cancer onset in humans? Preliminary results of an Italian cohort study." *Cancer Genet Cytogenet* 79 (2):133-5.
- Borhani, Nasim, Farzad Rajaei, Zivar Salehi, et Amir Javadi. 2011. "Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field." *Electromagnetic Biology and Medicine* 30 (4):246-252. doi: 10.3109/15368378.2011.589556.
- Bottura, V., M. Cappio Borlino, N. Carta, L. Cerise, et E. Imperial. 2009. "Urban exposure to ELF magnetic field due to high-, medium- and low-voltage electricity supply networks." *Radiation Protection Dosimetry* 137 (3-4):214-217. doi: 10.1093/rpd/ncp221.
- Bouwens, Mark, Stan de Kleijn, Gerben Ferwerda, Jan J. Cuppen, Huub F. J. Savelkoul, et B. M. Lidy Verburg-van Kemenade. 2012. "Low-frequency electromagnetic fields do not alter responses of inflammatory genes and proteins in human monocytes and immune cell lines." *Bioelectromagnetics* 33 (3):226-237. doi: 10.1002/bem.20695.
- Brouwer, Maartje, Tom Koeman, Piet A. van den Brandt, Hans Kromhout, Leo J. Schouten, Susan Peters, Anke Huss, et Roel Vermeulen. 2015. "Occupational exposures and Parkinson's disease mortality in a prospective Dutch cohort." *Occupational and Environmental Medicine* 72 (6):448-455. doi: 10.1136/oemed-2014-102209.
- Bunch, K. J., T. J. Keegan, J. Swanson, T. J. Vincent, et M. F. G. Murphy. 2014. "Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962–2008." *British Journal of Cancer* 110 (5):1402-1408. doi: 10.1038/bjc.2014.15.
- Bunch, K. J., J. Swanson, T. J. Vincent, et M. F. G. Murphy. 2015. "Magnetic fields and childhood cancer: an epidemiological investigation of the effects of high-voltage underground cables." *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection* 35 (3):695-705. doi: 10.1088/0952-4746/35/3/695.
- Çam, S. T., A. Firlarer, S. Özden, A. G. Canseven, et N. Seyhan. 2011. "Occupational exposure to magnetic fields from transformer stations and electric enclosures in Turkey." *Electromagnetic Biology and Medicine* 30 (2):74-79.
- Carrubba, S., C. Frilot, A. L. Chesson, et A. A. Marino. 2007. "Evidence of a nonlinear human magnetic sense." *Neuroscience* 144 (1):356-367. doi: 10.1016/j.neuroscience.2006.08.068.
- Carrubba, Simona, Clifton Frilot, Francis X. Hart, Andrew L. Chesson, et Andrew A. Marino. 2009. "The electric field is a sufficient physical determinant of the human magnetic sense."

International Journal of Radiation Biology 85 (7):622-632. doi: 10.1080/09553000902954538.

- Carrubba, Simona, Clifton Frilot li, Andrew L. Chesson Jr, et Andrew A. Marino. 2010. "Numerical analysis of recurrence plots to detect effect of environmental-strength magnetic fields on human brain electrical activity." *Medical Engineering & Physics* 32 (8):898-907. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.06.006.
- Chen, Chunhai, Xiangyu Ma, Min Zhong, et Zhengping Yu. 2010. "Extremely low-frequency electromagnetic fields exposure and female breast cancer risk: a meta-analysis based on 24,338 cases and 60,628 controls." *Breast cancer research and treatment* 123 (2):569-576. doi: 10.1007/s10549-010-0782-6.
- Chen, Qingsong, Li Lang, Wenzhe Wu, Guoyong Xu, Xiao Zhang, Tao Li, et Hanlin Huang. 2013. "A meta-analysis on the relationship between exposure to ELF-EMFs and the risk of female breast cancer."
- Cho, Seunghyun, Younhyun Lee, Sunyeong Lee, Young Joo Choi, et Hai Won Chung. 2014. "Enhanced cytotoxic and genotoxic effects of gadolinium following ELF-EMF irradiation in human lymphocytes." *Drug and Chemical Toxicology* 37 (4):440-447. doi: 10.3109/01480545.2013.879662.
- Cid, María Antonia, Alejandro Ubeda, María Luisa Hernández-Bule, María Antonia Martínez, et María Ángeles Trillo. 2012. "Antagonistic effects of a 50 Hz magnetic field and melatonin in the proliferation and differentiation of hepatocarcinoma cells." *Cellular Physiology and Biochemistry: International Journal of Experimental Cellular Physiology, Biochemistry, and Pharmacology* 30 (6):1502-1516. doi: 10.1159/000343338.
- Contessa, G. M., R. Falsaperla, V. Brugaletta, et P. Rossi. 2010. "Exposure to magnetic fields of railway engine drivers: A case study in Italy." *Radiation Protection Dosimetry* 142 (2-4):160-167.
- Crespi, Catherine M., Ximena P. Vergara, Chris Hooper, Sona Oksuzyan, Sheng Wu, Myles Cockburn, et Leeka Kheifets. 2016. "Childhood leukaemia and distance from power lines in California: a population-based case-control study." *British Journal of Cancer*. doi: 10.1038/bjc.2016.142.
- Cuccurazzu, B., L. Leone, M. V. Podda, R. Piacentini, E. Riccardi, C. Ripoli, G. B. Azzena, et C. Grassi. 2010. "Exposure to extremely low-frequency (50Hz) electromagnetic fields enhances adult hippocampal neurogenesis in C57BL/6 mice." *Experimental Neurology* 226 (1):173-182.
- Cui, Yonghua, Zhiqiang Ge, Joshua Dominic Rizak, Chao Zhai, Zhu Zhou, Songjie Gong, et Yi Che. 2012. "Deficits in Water Maze Performance and Oxidative Stress in the Hippocampus and Striatum Induced by Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure." *PLOS ONE* 7 (5):e32196. doi: 10.1371/journal.pone.0032196.
- Cui, Y., X. Liu, T. Yang, Y. A. Mei, et C. Hu. 2014. "Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields inhibits T-type calcium channels via AA/LTE4 signaling pathway." *Cell calcium* 55 (1):48-58.
- d'Amore, G., L. Anglesio, M. Tasso, A. Benedetto, et S. Roletti. 2001. "Outdoor background ELF magnetic fields in an urban environment." *Radiation Protection Dosimetry* 94 (4):375-380.
- de Groot, Martje W. G. D. M., Marjolijn D. M. Kock, et Remco H. S. Westerink. 2014. "Assessment of the neurotoxic potential of exposure to 50 Hz extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) in naïve and chemically stressed PC12 cells." *NeuroToxicology* 44:358-364. doi: 10.1016/j.neuro.2014.07.009.
- Del Re, Brunella, Pamela Marcantonio, Entelè Gavocci, Ferdinando Bersani, et Gianfranco Giorgi. 2012. "Assessing LINE-1 retrotransposition activity in neuroblastoma cells exposed to

- extremely low-frequency pulsed magnetic fields." *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 749 (1–2):76–81. doi: 10.1016/j.mrgentox.2012.07.004.
- Del Seppia, Cristina, Sergio Ghione, Paolo Luschi, Klaus-Peter Ossenkopp, Elena Choleris, et Martin Kavaliers. 2007. "Pain perception and electromagnetic fields." *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 31 (4):619–642. doi: 10.1016/j.neubiorev.2007.01.003.
- Destefanis, M., M. Viano, C. Leo, G. Gervino, A. Ponzetto, et F. Silvagno. 2015. "Extremely low frequency electromagnetic fields affect proliferation and mitochondrial activity of human cancer cell lines." *International Journal of Radiation Biology* 91 (12):964–972. doi: 10.3109/09553002.2015.1101648.
- Does, Monique, Ghislaine Scélo, Catherine Metayer, Steve Selvin, Robert Kavet, et Patricia Buffler. 2010. "Exposure to electrical contact currents and the risk of childhood leukemia." *Radiation Research* 175 (3):390–396.
- Dominici, Luca, Milena Villarini, Cristina Fatigoni, Silvano Monarca, et Massimo Moretti. 2011. "Genotoxic hazard evaluation in welders occupationally exposed to extremely low-frequency magnetic fields (ELF-MF)." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 215 (1):68–75. doi: 10.1016/j.ijheh.2011.07.010.
- Draper, Gerald, Tim Vincent, Mary E. Kroll, et John Swanson. 2005. "Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study." *BMJ (Clinical research ed.)* 330 (7503):1290. doi: 10.1136/bmj.330.7503.1290.
- Duan, Yuqing, Zhigao Wang, Haihui Zhang, Yuanqing He, Rong Fan, Yanxiang Cheng, Guibo Sun, et Xiaobo Sun. 2014. "Extremely low frequency electromagnetic field exposure causes cognitive impairment associated with alteration of the glutamate level, MAPK pathway activation and decreased CREB phosphorylation in mice hippocampus: reversal by procyanidins extracted from the lotus seedpod." *Food & Function* 5 (9):2289–2297. doi: 10.1039/C4FO00250D.
- Duan, Weixia, Chuan Liu, Lei Zhang, Mindi He, Shangcheng Xu, Chunhai Chen, Huifeng Pi, Peng Gao, Yanwen Zhang, Min Zhong, Zhengping Yu, et Zhou Zhou. 2015. "Comparison of the genotoxic effects induced by 50 Hz extremely low-frequency electromagnetic fields and 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in GC-2 cells." *Radiation Research* 183 (3):305–314. doi: 10.1667/RR13851.1.
- Dyche, J., A. M. Anch, K. A. J. Fogler, D. W. Barnett, et C. Thomas. 2012. "Effects of power frequency electromagnetic fields on melatonin and sleep in the rat." *Emerging Health Threats Journal* 5 (1).
- El-Gebaly, R. H., N. S. El-Bialy, et M. M. Rageh. 2012. "A 50 Hz 0.5 mT magnetic field induces cytogenetic effects and biological alterations in Wistar rat." *Life Science Journal* 9 (4):1875–1881.
- El Gohary, M. I., A. A. Salama, A. A. El Saeid, T. M. El Sayed, et H. Sh Kotb. 2013. "Influence of Magnetic Field on Brain Activity During Administration of Caffeine."
- Elliott, P., G. Shaddick, M. Douglass, K. De Hoogh, D. J. Briggs, et M. B. Toledano. 2013. "Adult cancers near high-voltage overhead power lines." *Epidemiology* 24 (2):184–190.
- Elmas, Onur, Selcuk Comlekci, et Halis Koylu. 2012. "Effects of short-term exposure to powerline-frequency electromagnetic field on the electrical activity of the heart." *Archives of environmental & occupational health* 67 (2):65–71. doi: 10.1080/19338244.2011.578680.
- Elmas, Onur, et Selcuk Comlekci. 2015. "Investigation of effects of short-term exposure to 50 HZ magnetic field on central, peripheral, and autonomic nervous systems in rats." *Bioelectromagnetics* 36 (6):420–429. doi: 10.1002/bem.21922.
- Erren, T. C. 2001. "A meta-analysis of epidemiologic studies of electric and magnetic fields and breast cancer in women and men." *Bioelectromagnetics* Suppl 5:S105–119.

- Fews, A. P., D. L. Henshaw, R. J. Wilding, et P. A. Keitch. 1999. "Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols." *International Journal of Radiation Biology* 75 (12):1523-1531.
- Feychting, M., et A. Ahlbom. 1993. "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines." *American Journal of Epidemiology* 138 (7):467-481.
- Firestone, J. A., Lundin, J. I., Powers, K. M., Smith-Weller, T., Franklin, G. M., Swanson, P. D., Checkoway, H. (2010). Occupational factors and risk of parkinson's disease: A population-based case-control study. *American Journal of Industrial Medicine*, 53(3), 217-223. doi:10.1002/ajim.20788
- Fischer, Heidi, Leeka Kheifets, Anke Huss, Tracy L. Peters, Roel Vermeulen, Weimin Ye, Fang Fang, Pernilla Wiebert, Ximena P. Vergara, et Maria Feychting. 2015. "Occupational Exposure to Electric Shocks and Magnetic Fields and Amyotrophic Lateral Sclerosis in Sweden." *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 26 (6):824-830. doi: 10.1097/EDE.0000000000000365.
- Focke, Frauke, David Schuermann, Niels Kuster, et Primo Schär. 2010. "DNA fragmentation in human fibroblasts under extremely low frequency electromagnetic field exposure." *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 683 (1–2):74-83. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2009.10.012.
- Frei, Patrizia, Aslak Harbo Poulsen, Gabor Mezei, Camilla Pedersen, Lise Cronberg Salem, Christoffer Johansen, Martin Röösl, et Joachim Schüz. 2013. "Residential Distance to High-voltage Power Lines and Risk of Neurodegenerative Diseases: a Danish Population-based Case-Control Study." *American Journal of Epidemiology* 177 (9):970-978. doi: 10.1093/aje/kws334.
- Gadhia, Pankaj, Sumitra Chakraborty, et Meonis Pithawala. 2010. "Cytogenetic Studies on Railway Engine Drivers Exposed to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields (ELF-EMF)." *International Journal of Human Genetics* 10 (4):263-269. doi: 10.1080/09723757.2010.11886116.
- Gajšek, Peter, Paolo Ravazzani, James Grellier, Theodoros Samaras, József Bakos, et György Thuróczy. 2016. "Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in Europe: Low Frequency Fields (50 Hz–100 kHz)." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (9):875. doi: 10.3390/ijerph13090875.
- Gallois, P., G. Forzy, P. Hautecoeur, P. Louchart, et L. Peyrodie. 2000. "Une nouvelle manière de lire l'EEG : l'analyse non linéaire." *Actualité en neurologie* 1 (7):257-257.
- Giorgi, Gianfranco, Mariangela Lecciso, Miriam Capri, Stella Lukas Yani, Angela Virelli, Ferdinando Bersani, et Brunella Del Re. 2014. "An evaluation of genotoxicity in human neuronal-type cells subjected to oxidative stress under an extremely low frequency pulsed magnetic field." *Mutation Research. Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 775-776:31-37. doi: 10.1016/j.mrgentox.2014.10.003.
- Gobba, Fabriziomaria, Giulia Bravo, Paolo Rossi, Gian Marco Contessa, et Meri Scaringi. 2011. "Occupational and environmental exposure to extremely low frequency-magnetic fields: a personal monitoring study in a large group of workers in Italy." *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 21 (6):634-645. doi: 10.1038/jes.2011.9.
- Golbach, Lieke A., Marleen H. Scheer, Jan J. M. Cuppen, Huub Savelkoul, et B. M. Lidy Verburg-van Kemenade. 2015. "Low-Frequency Electromagnetic Field Exposure Enhances Extracellular Trap Formation by Human Neutrophils through the NADPH Pathway." *Journal of Innate Immunity* 7 (5):459-465. doi: 10.1159/000380764.
- Greenland, S., A. R. Sheppard, W. T. Kaune, C. Poole, et M. A. Kelsh. 2000. "A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group." *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 11 (6):624-634.

- Grellier, James, Paolo Ravazzani, et Elisabeth Cardis. 2014. "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe." *Environment International* 62:55-63. doi: 10.1016/j.envint.2013.09.017.
- Gutiérrez-Mercado, Y. K., L. Cañedo-Dorantes, U. Gómez-Pinedo, G. Serrano-Luna, J. Bañuelos-Pineda, et A. Feria-Velasco. 2013. "Increased vascular permeability in the circumventricular organs of adult rat brain due to stimulation by extremely low frequency magnetic fields." *Bioelectromagnetics* 34 (2):145-155.
- Halgamuge. 2010. "Measurement and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars." *ResearchGate*.
- Hareuveny, Ronen, Shaiela Kandel, Nir-Mordechay Yitzhak, Leeka Kheifets, et Gabor Mezei. 2011. "Exposure to 50 Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations in Israel." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 21 (4):365-371. doi: 10.1038/jes.2010.20.
- Hareuveny, Ronen, Madhuri Sudan, Malka N. Halgamuge, Yoav Yaffe, Yuval Tzabari, Daniel Namir, et Leeka Kheifets. 2015. "Characterization of extremely low frequency magnetic fields from diesel, gasoline and hybrid cars under controlled conditions." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (2):1651-1666. doi: 10.3390/ijerph120201651.
- He, Y. L., D. D. Liu, Y. J. Fang, X. Q. Zhan, J. J. Yao, et Y. A. Mei. 2013. "Exposure to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Modulates Na⁺ Currents in Rat Cerebellar Granule Cells through Increase of AA/PGE2 and EP Receptor-Mediated cAMP/PKA Pathway." *PLOS ONE* 8 (1).
- Hong, M. N., N. K. Han, H. C. Lee, Y. K. Ko, S. G. Chi, Y. S. Lee, Y. M. Gimm, S. H. Myung, et J. S. Lee. 2012. "Extremely low frequency magnetic fields do not elicit oxidative stress in MCF10A cells." *Journal of Radiation Research* 53 (1):79-86. doi: 10.1269/jrr.11049.
- Hori, Takuya, Noboru Inoue, Hiroshi Suzuki, et Shinji Harakawa. 2015. "Exposure to 50 Hz electric fields reduces stress-induced glucocorticoid levels in BALB/c mice in a kV/m- and duration-dependent manner." *Bioelectromagnetics* 36 (4):302-308. doi: 10.1002/bem.21914.
- Hosseini, Monireh, Mohammad Reza Monazzam, Laleh Farhang Matin, et Hossein Khosroabadi. 2015. "Hazard zoning around electric substations of petrochemical industries by stimulation of extremely low-frequency magnetic fields." *Environmental Monitoring and Assessment* 187 (5):258. doi: 10.1007/s10661-015-4449-y.
- Huang, Shu-Min, Yu-Wen Lin, Fung-Chang Sung, Chung-Yi Li, Ming-Fong Chang, et Pei-Chun Chen. 2011. "Occupational exposure of dentists to extremely-low-frequency magnetic field." *Journal of occupational health* 53 (2):130-136.
- Hug, Kerstin, Leticia Grize, Andreas Seidler, Peter Kaatsch, and Joachim Schüz. 2010. "Parental Occupational Exposure to Extremely Low Frequency Magnetic Fields and Childhood Cancer: A German Case-Control Study." *American Journal of Epidemiology* 171 (1): 27-35.
- Huss, Anke, Kelly Goris, Roel Vermeulen, et Hans Kromhout. 2013. "Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels?" *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 23 (5):554-558. doi: 10.1038/jes.2012.130.
- Huss, Anke, Adrian Spoerri, Matthias Egger, Hans Kromhout, Roel Vermeulen, et Cohort Swiss National. 2015a. "Occupational exposure to magnetic fields and electric shocks and risk of ALS: the Swiss National Cohort." *Amyotrophic Lateral Sclerosis & Frontotemporal Degeneration* 16 (1-2):80-85. doi: 10.3109/21678421.2014.954588.
- Huss, Anke, Tom Koeman, Hans Kromhout, et Roel Vermeulen. 2015b. "Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure and Parkinson's Disease-A Systematic Review and Meta-Analysis of the Data." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (7):7348-7356. doi: 10.3390/ijerph120707348.

- Hwang, Y. H., H. S. Song, H. R. Kim, M. S. Ko, J. M. Jeong, Y. H. Kim, J. S. Ryu, U. D. Sohn, Y. M. Gimm, S. H. Myung, et S. S. Sim. 2011. "Intracellular Ca²⁺ mobilization and beta-hexosaminidase release are not influenced by 60 Hz-electromagnetic fields (EMF) in RBL 2H3 cells." *Korean Journal of Physiology and Pharmacology* 15 (5):313-317.
- Iarc Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans,. 2002. "Non-ionizing radiation, Part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields." *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans* 80:1-395.
- Icnirp. 1998. "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)." *Health Physics* 74 (4):494-521.
- Icnirp. 2010. "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)." *Health Physics* 99 (6):818-836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- Icnirp. 2014. "Icnirp guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz." *Health Physics* 106 (3):418-425.
- Ilonen, K., A. Markkanen, G. Mezei, et Jukka Juutilainen. 2008. "Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure." *Bioelectromagnetics* 29 (3):213-218. doi: 10.1002/bem.20385.
- Ince, B., Z. Akdag, E. Bahsi, S. Erdogan, S. Celik, Z. Akkus, M. Dalli, C. Sahbaz, M. Akdogan, R. Kara, Y. Yavuz, V. Gullu, A. Gunay, et K. Guven. 2012. "Can exposure to manganese and extremely low frequency magnetic fields affect some important elements in the rat teeth?" *European review for medical and pharmacological sciences* 16 (6):763-769.
- INRS. 2011. "Intégrer le risque "rayonnement électromagnétiques" dans le document unique d'évaluation des risques professionnels." *Hygiène et sécurité du travail* ND 2350 - 225:45-53.
- INRS. 2016. "Rayonnements optiques & électromagnétiques au travail." *Compte rendu de congrès*.
- Jahandideh, S., P. Abdolmaleki, et M. M. Movahedi. 2010. "Comparing performances of logistic regression and neural networks for predicting melatonin excretion patterns in the rat exposed to ELF magnetic fields." *Bioelectromagnetics* 31 (2):164-171.
- Jahandideh, Samad, et Parviz Abdolmaleki. 2010. "Prediction of melatonin excretion patterns in the rat exposed to ELF magnetic fields based on support vector machine and linear discriminant analysis." *Micron (Oxford, England: 1993)* 41 (7):882-885. doi: 10.1016/j.micron.2010.04.002.
- Janać, B., V. Selaković, S. Rauš, L. Radenović, M. Zrnić, et Z. Prolić. 2012. "Temporal patterns of extremely low frequency magnetic field-induced motor behavior changes in Mongolian gerbils of different age." *International Journal of Radiation Biology* 88 (4):359-366.
- Jia, H. L., C. Wang, Y. Li, Y. Lu, P. P. Wang, W. D. Pan, et T. Song. 2014. "Combined effects of 50 Hz magnetic field and magnetic nanoparticles on the proliferation and apoptosis of PC12 cells." *Biomedical and Environmental Sciences* 27 (2):97-105. doi: 10.3967/bes2014.022.
- Jin, Y. B., G. Y. Kang, J. S. Lee, J. I. Choi, J. W. Lee, S. C. Hong, S. H. Myung, et Y. S. Lee. 2012. "Effects on micronuclei formation of 60-Hz electromagnetic field exposure with ionizing radiation, hydrogen peroxide, or c-Myc overexpression." *International Journal of Radiation Biology* 88 (4):374-380. doi: 10.3109/09553002.2012.652724.
- Jin, Y. B., S. H. Choi, J. S. Lee, J. K. Kim, J. W. Lee, S. C. Hong, S. H. Myung, et Y. S. Lee. 2014. "Absence of DNA damage after 60-Hz electromagnetic field exposure combined with ionizing radiation, hydrogen peroxide, or c-Myc overexpression." *Radiation and Environmental Biophysics* 53 (1):93-101. doi: 10.1007/s00411-013-0506-5.

- Jirik, V., L. Pekarek, et V. Janout. 2011. "Assessment of population exposure to extremely low frequency magnetic fields and its possible childhood health risk in the Czech Republic." *Indoor and Built Environment* 20 (3):362-368.
- Jirik, V., L. Pekarek, V. Janout, et H. Tomaskova. 2012. "Association between childhood leukaemia and exposure to power-frequency magnetic fields in Middle Europe." *Biomedical and Environmental Sciences* 25 (5):597-601.
- Joseph, Wout, Leen Verloock, et Luc Martens. 2008. "Measurements of ELF electromagnetic exposure of the general public from Belgian power distribution substations." *Health Physics* 94 (1):57-66. doi: 10.1097/01.HP.0000282043.53270.f.
- Jüni, P., A. Witschi, R. Bloch, and M. Egger. 1999. "The Hazards of Scoring the Quality of Clinical Trials for Meta-Analysis." *JAMA* 282 (11): 1054–60.
- Kantar Gok, D., D. Akpinar, P. Yargicoglu, S. Ozen, M. Aslan, N. Demir, N. Derin, et A. Agar. 2014. "Effects of extremely low-frequency electric fields at different intensities and exposure durations on mismatch negativity." *Neuroscience* 272:154-166. doi: 10.1016/j.neuroscience.2014.04.056.
- Karabetsos, Efthymios, Kalampaliki, George Tsanidis, Koutounidis, Skamnakis, Kyritsi, et Yalofas. 2010. "EMF measurements in hybrid technology cars." 6th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, 2010/10/10/.
- Karabetsos, E., E. Kalampaliki, et D. Koutounidis. 2014. "Testing Hybrid Technology Cars: Static and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Measurements." *IEEE Vehicular Technology Magazine* 9 (4):34-39. doi: 10.1109/MVT.2014.2360651.
- Karipidis, et et al. 2015. "Survey of residential power-frequency magnetic fields in Melbourne, Australia." *Radiation Protection Dosimetry* 163 (1):81-91. doi: doi:10.1093/rpd/ncu137.
- Kato, Ikuko, Alicia Young, Jingmin Liu, Judith Abrams, Cathryn Bock, et Michael Simon. 2015. "Electric Blanket Use and Risk of Thyroid Cancer in the Women's Health Initiative Observational Cohort." *Women & Health*:1-13. doi: 10.1080/03630242.2015.1050545.
- Kaune, W. T., R. G. Stevens, N. J. Callahan, R. K. Severson, et D. B. Thomas. 1987. "Residential magnetic and electric fields." *Bioelectromagnetics* 8 (4):315-335.
- Kaya, F. A., M. Z. Akdag, C. A. Kaya, M. S. Celik, N. Kilinc, S. Ozekinci, E. Saribas, E. Uysal, A. G. Dogru, et G. G. Tekin. 2011. "Effects of ELF-MF and strontium ranelate on periodontium in rats (Duble Blind)." *Journal of Animal and Veterinary Advances* 10 (23):3074-3079.
- Keegan, T. J., K. J. Bunch, T. J. Vincent, J. C. King, K. A. O'Neill, G. M. Kendall, A. MacCarthy, N. T. Fear, et Murphy Mfg. 2012. "Case–control study of paternal occupation and childhood leukaemia in Great Britain, 1962–2006." *British Journal of Cancer* 107 (9):1652-1659. doi: 10.1038/bjc.2012.359.
- Kesari, K. K., J. Luukkonen, J. Juutilainen, et J. Naarala. 2015. "Genomic instability induced by 50Hz magnetic fields is a dynamically evolving process not blocked by antioxidant treatment." *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 794:46-51. doi: 10.1016/j.mrgentox.2015.10.004.
- Kheifets, L., A. Ahlbom, C. M. Crespi, G. Draper, J. Hagihara, R. M. Lowenthal, G. Mezei, S. Oksuzyan, J. Schüz, J. Swanson, A. Tittarelli, M. Vinceti, et V. Wunsch Filho. 2010a. "Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia." *British Journal of Cancer* 103 (7):1128-1135. doi: 10.1038/sj.bjc.6605838.
- Kheifets, L., A. Ahlbom, C. M. Crespi, M. Feychting, C. Johansen, J. Monroe, M. F. G. Murphy, S. Oksuzyan, S. Preston-Martin, E. Roman, T. Saito, D. Savitz, J. Schuz, J. Simpson, J. Swanson, T. Tynes, P. Verkasalo, et G. Mezei. 2010b. "A Pooled Analysis of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields and Childhood Brain Tumors." *American Journal of Epidemiology* 172 (7):752-761. doi: 10.1093/aje/kwq181.

- Kheifets, Leeka, Catherine M. Crespi, Chris Hooper, Sona Oksuzyan, Myles Cockburn, Thomas Ly, et Gabor Mezei. 2015. "Epidemiologic study of residential proximity to transmission lines and childhood cancer in California: description of design, epidemiologic methods and study population." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 25 (1):45-52. doi: 10.1038/jes.2013.48.
- Kheifets, Leeka, Catherine M. Crespi, Chris Hooper, Myles Cockburn, Aryana T. Amoon, et Ximena P. Vergara. 2017. "Residential magnetic fields exposure and childhood leukemia: a population-based case-control study in California." *Cancer causes & control: CCC* 28 (10):1117-1123. doi: 10.1007/s10552-017-0951-6.
- Koeman, Tom, Piet A. van den Brandt, Pauline Slottje, Leo J. Schouten, R. Alexandra Goldbohm, Hans Kromhout, et Roel Vermeulen. 2014. "Occupational extremely low-frequency magnetic field exposure and selected cancer outcomes in a prospective Dutch cohort." *Cancer causes & control: CCC* 25 (2):203-214. doi: 10.1007/s10552-013-0322-x.
- Koeman, Tom, Leo J. Schouten, Piet A. van den Brandt, Pauline Slottje, Anke Huss, Susan Peters, Hans Kromhout, et Roel Vermeulen. 2015. "Occupational exposures and risk of dementia-related mortality in the prospective Netherlands Cohort Study." *American Journal of Industrial Medicine* 58 (6):625-635. doi: 10.1002/ajim.22462.
- Komaki, Alireza, Afshin Khalili, Iraj Salehi, Siamak Shahidi, et Abdolrahman Sarihi. 2014. "Effects of exposure to an extremely low frequency electromagnetic field on hippocampal long-term potentiation in rat." *Brain Research* 1564:1-8. doi: 10.1016/j.brainres.2014.03.041.
- Koppel, T., T. Tasa, et P. Tint. 2013. "Electromagnetic fields in contemporary office workplaces." *Agronomy Research* 11 (2):421-434.
- Korr, Hubert, Nicholas B. Angstman, Tatjana B. Born, Kerstin Bosse, Birka Brauns, Martin Demmler, Katja Fueller, Orsolya Kántor, Barbara M. Kever, Navida Rahimyar, Sepideh Salimi, Jiri Silny, et Christoph Schmitz. 2014. "No Evidence of Persisting Unrepaired Nuclear DNA Single Strand Breaks in Distinct Types of Cells in the Brain, Kidney, and Liver of Adult Mice after Continuous Eight-Week 50 Hz Magnetic Field Exposure with Flux Density of 0.1 mT or 1.0 mT." *PLOS ONE* 9 (10):e109774. doi: 10.1371/journal.pone.0109774.
- Koziak, Adrian M., Dawn Desjardins, Lynn D. Keenlside, Alex W. Thomas, et Frank S. Prato. 2006. "Light alters nociceptive effects of magnetic field shielding." *Bioelectromagnetics* 27 (1):10-15. doi: 10.1002/bem.20170.
- Kroll, M. E., J. Swanson, T. J. Vincent, et G. J. Draper. 2010. "Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study." *British Journal of Cancer* 103 (7):1122-1127. doi: 10.1038/sj.bjc.6605795.
- Lagroye, Isabelle, Yann Percherancier, Jukka Juutilainen, Florence Poulletier De Gannes, et Bernard Veyret. 2011. "ELF magnetic fields: animal studies, mechanisms of action." *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 107 (3):369-373. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2011.09.003.
- Leitgeb, Norbert. 2014. "Childhood Leukemia Not Linked with ELF Magnetic Fields." *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications* 6:174-183.
- Leone, Lucia, Salvatore Fusco, Alessia Mastrodonato, Roberto Piacentini, Saviana Antonella Barbati, Salvatore Zaffina, Giovambattista Pani, Maria Vittoria Podda, et Claudio Grassi. 2014. "Epigenetic modulation of adult hippocampal neurogenesis by extremely low-frequency electromagnetic fields." *Molecular Neurobiology* 49 (3):1472-1486. doi: 10.1007/s12035-014-8650-8.
- Lewczuk, Bogdan, Grzegorz Redlarski, Arkadiusz Zak, Natalia Ziólkowska, Barbara Przybylska-Gornowicz, et Marek Krawczuk. 2014. "Influence of electric, magnetic, and electromagnetic

- fields on the circadian system: current stage of knowledge." *BioMed Research International* 2014:169459. doi: 10.1155/2014/169459.
- Li, W., R. M. Ray, D. B. Thomas, M. Yost, S. Davis, N. Breslow, D. L. Gao, E. D. Fitzgibbons, J. E. Camp, E. Wong, K. J. Wernli, et H. Checkoway. 2013. "Occupational Exposure to Magnetic Fields and Breast Cancer Among Women Textile Workers in Shanghai, China." *American Journal of Epidemiology* 178 (7):1038-1045. doi: 10.1093/aje/kwt161.
- Li, Y., C. Zhang, et T. Song. 2014a. "Disturbance of the magnetic field did not affect spatial memory." *Physiological Research / Academia Scientiarum Bohemoslovaca* 63 (3):377-385.
- Li, C., M. Xie, F. Luo, C. He, J. Wang, G. Tan, et Z. Hu. 2014b. "The extremely low-frequency magnetic field exposure differently affects the AMPAR and NMDAR subunit expressions in the hippocampus, entorhinal cortex and prefrontal cortex without effects on the rat spatial learning and memory." *Environmental Research* 134:74-80. doi: 10.1016/j.envres.2014.06.025.
- Li, Yuan, Xiaodong Yan, Juanfang Liu, Ling Li, Xinghua Hu, Honghui Sun, et Jing Tian. 2014c. "Pulsed electromagnetic field enhances brain-derived neurotrophic factor expression through L-type voltage-gated calcium channel- and Erk-dependent signaling pathways in neonatal rat dorsal root ganglion neurons." *Neurochemistry International* 75:96-104. doi: 10.1016/j.neuint.2014.06.004.
- Liebl, Martina P., Johannes Windschmitt, Anna S. Besemer, Anne-Kathrin Schäfer, Helmut Reber, Christian Behl, et Albrecht M. Clement. 2015. "Low-frequency magnetic fields do not aggravate disease in mouse models of Alzheimer's disease and amyotrophic lateral sclerosis." *Scientific Reports* 5:srep08585. doi: 10.1038/srep08585.
- Liorni, Ilaria, Marta Parazzini, Serena Fiocchi, Mark Douglas, Myles Capstick, Marie-Christine Gosselin, Niels Kuster, et Paolo Ravazzani. 2014. "Dosimetric study of fetal exposure to uniform magnetic fields at 50 Hz." *Bioelectromagnetics* 35 (8):580-597. doi: 10.1002/bem.21878.
- Liorni, Ilaria, Marta Parazzini, Serena Fiocchi, Mark Douglas, Myles Capstick, Niels Kuster, et Paolo Ravazzani. 2015a. "Computational assessment of pregnant woman models exposed to uniform elf-magnetic fields: compliance with the european current exposure regulations for the general public and occupational exposures at 50 Hz." *Radiation Protection Dosimetry*:ncv488. doi: 10.1093/rpd/ncv488.
- Liorni, Ilaria, Marta Parazzini, Serena Fiocchi, et Paolo Ravazzani. 2015b. "Study of the Influence of the Orientation of a 50-Hz Magnetic Field on Fetal Exposure Using Polynomial Chaos Decomposition." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (6):5934-5953. doi: 10.3390/ijerph120605934.
- Liu, Dong-Dong, Zhen Ren, Guang Yang, Qian-Ru Zhao, et Yan-Ai Mei. 2014. "Melatonin protects rat cerebellar granule cells against electromagnetic field-induced increases in Na⁺ currents through intracellular Ca²⁺ release." *Journal of Cellular and Molecular Medicine* 18 (6):1060-1070. doi: 10.1111/jcmm.12250.
- Liu, Xiao, Hongyan Zuo, Dewen Wang, Ruiyun Peng, Tao Song, Shuiming Wang, Xiping Xu, Yabing Gao, Yang Li, Shaoxia Wang, Lifeng Wang, et Li Zhao. 2015. "Improvement of Spatial Memory Disorder and Hippocampal Damage by Exposure to Electromagnetic Fields in an Alzheimer's Disease Rat Model." *PLOS ONE* 10 (5). doi: 10.1371/journal.pone.0126963.
- London, S. J., D. C. Thomas, J. D. Bowman, E. Sobel, T. C. Cheng, et J. M. Peters. 1991. "Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia." *American Journal of Epidemiology* 134 (9):923-937.
- Luukkonen, Jukka, Anu Liimatainen, Anne Höytö, Jukka Juutilainen, et Jonne Naarala. 2011. "Pre-Exposure to 50 Hz Magnetic Fields Modifies Menadione-Induced Genotoxic Effects in

- Human SH-SY5Y Neuroblastoma Cells." *PLOS ONE* 6 (3):e18021. doi: 10.1371/journal.pone.0018021.
- Luukkonen, J., A. Liimatainen, J. Juutilainen, et J. Naarala. 2014. "Induction of genomic instability, oxidative processes, and mitochondrial activity by 50Hz magnetic fields in human SH-SY5Y neuroblastoma cells." *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 760:33-41. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2013.12.002.
- Magne, Isabelle, Martine Souques, Isabelle Bureau, Anne Duburcq, Emmanuel Remy, et Jacques Lambrozo. 2016. "Exposure of children to extremely low frequency magnetic fields in France: Results of the EXPERS study." *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. doi: 10.1038/jes.2016.59.
- Malagoli, Carlotta, Sara Fabbi, Sergio Teggi, Mariagiulia Calzari, Maurizio Poli, Elena Ballotti, Barbara Notari, Maurizio Bruni, Giovanni Palazzi, Paolo Paolucci, et Marco Vinceti. 2010. "Risk of hematological malignancies associated with magnetic fields exposure from power lines: a case-control study in two municipalities of northern Italy." *Environmental health: a global access science source* 9:16. doi: 10.1186/1476-069X-9-16.
- Maluckov, B. S., V. Tasić, S. Alagić, S. Mladenović, J. T. Pejković, M. K. Radović, et Č. A. Maluckov. 2014. "Measurement of extremely low frequent magnetic induction in residential buildings." *International Journal of Environmental Research* 8 (3):583-590.
- Manikonda, Pavan K., Pilankatta Rajendra, D. Devendranath, B. Gunasekaran, null Channakeshava, Shivakumara R. S. Aradhya, Rao B. Sashidhar, et Chivukula Subramanyam. 2014. "Extremely low frequency magnetic fields induce oxidative stress in rat brain." *General Physiology and Biophysics* 33 (1):81-90. doi: 10.4149/gpb_2013059.
- Manjhi, J., S. Kumar, J. Behari, et R. Mathur. 2013. "Effect of extremely low frequency magnetic field in prevention of spinal cord injury-induced osteoporosis." *Journal of Rehabilitation Research and Development* 50 (1):17-30.
- Mansourian, Mahsa, Hamid Reza Marateb, et Golnaz Vaseghi. 2016. "The effect of extremely low-frequency magnetic field (50-60 Hz) exposure on spontaneous apoptosis: The results of a meta-analysis." *Advanced Biomedical Research* 5:141. doi: 10.4103/2277-9175.187375.
- Manzella, Nicola, Massimo Bracci, Veronica Ciarapica, Sara Staffolani, Elisabetta Straffella, Venerando Rapisarda, Matteo Valentino, Monica Amati, Alfredo Copertaro, et Lory Santarelli. 2015. "Circadian gene expression and extremely low-frequency magnetic fields: An in vitro study." *Bioelectromagnetics* 36 (4):294-301. doi: 10.1002/bem.21915.
- Marcilio, I., N. Gouveia, M. L. P. Filho, et L. Kheifets. 2011. "Adult mortality from leukemia, brain cancer, amyotrophic lateral sclerosis and magnetic fields from power lines: A case-control study in Brazil." *Revista Brasileira de Epidemiologia* 14 (4):580-588. doi: 10.1590/S1415-790X2011000400005.
- Mariucci, G., M. Villarini, M. Moretti, E. Taha, C. Conte, A. Minelli, C. Aristei, et M. V. Ambrosini. 2010. "Brain DNA damage and 70-kDa heat shock protein expression in CD1 mice exposed to extremely low frequency magnetic fields." *International Journal of Radiation Biology* 86 (8):701-710.
- Martínez, María Antonia, Alejandro Úbeda, María Antonia Cid, et María Ángeles Trillo. 2012. "The proliferative response of NB69 human neuroblastoma cells to a 50 Hz magnetic field is mediated by ERK1/2 signaling." *Cellular Physiology and Biochemistry: International Journal of Experimental Cellular Physiology, Biochemistry, and Pharmacology* 29 (5-6):675-686. doi: 10.1159/000178457.
- Martínez, María Antonia, María Ángeles Trillo, María Antonia Cid, Carlos L. Paíno, et Alejandro Úbeda. 2015. "Power-Frequency Magnetic Field Inhibits Adipogenic Differentiation in Human ADSC." *Cellular Physiology and Biochemistry: International Journal of Experimental*

Cellular Physiology, Biochemistry, and Pharmacology 37 (6):2297-2310. doi: 10.1159/000438585.

- Mattsson, Mats-Olof, et Myrtil Simkó. 2014. "Grouping of Experimental Conditions as an Approach to Evaluate Effects of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Oxidative Response in in vitro Studies." *Frontiers in Public Health* 2:132. doi: 10.3389/fpubh.2014.00132.
- McBride, M. L., R. P. Gallagher, G. Thériault, B. G. Armstrong, S. Tamaro, J. J. Spinelli, J. E. Deadman, S. Fincham, D. Robson, et W. Choi. 1999. "Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada." *American Journal of Epidemiology* 149 (9):831-842.
- Menon, Vinod. 2011. "Large-scale brain networks and psychopathology: a unifying triple network model." *Trends in Cognitive Sciences* 15 (10):483-506. doi: 10.1016/j.tics.2011.08.003.
- Merckel, O., A. Azoulay, et T. Letertre. 2009. "Assessment of exposure to low frequency magnetic fields in the village of Champlan." *Caractérisation de l'exposition aux champs magnétiques basses fréquences dans la commune de Champlan* 8 (3):237-244.
- Modolo, Julien, Alex W. Thomas, et Alexandre Legros. 2013. "Possible mechanisms of synaptic plasticity modulation by extremely low-frequency magnetic fields." *Electromagnetic Biology and Medicine* 32 (2):137-144. doi: 10.3109/15368378.2013.776341.
- OFSP, office fédérale de santé publique. 2016. "Fiche d'information - Automobiles, automobiles hybrides."
- Okudan, N., I. Celik, A. Salbacak, A. E. Cicekcibasi, M. Buyukmumcu, et H. Gokbel. 2010. "Effects of long-term 50 Hz magnetic field exposure on the micro nucleated polychromatic erythrocyte and blood lymphocyte frequency and argyrophilic nucleolar organizer regions in lymphocytes of mice." *Neuroendocrinology Letters* 31 (2):208-214.
- Olsen, J. H., A. Nielsen, et G. Schulgen. 1993. "Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children." *BMJ (Clinical research ed.)* 307 (6909):891-895.
- Paniagua, Jesús M., Jiménez, A., Rufo, M., & Antolin, A. (2004). Exposure assessment of ELF magnetic fields in urban environments in extremadura (spain). *Bioelectromagnetics*, 25(1), 58-62. doi:10.1002/bem.10147
- Paniagua, Jesús M., Jiménez, A., Rufo, M., Gutiérrez, J. A., Gómez, F. J., & Antolín, A. (2007). Exposure to extremely low frequency magnetic fields in an urban area. *Radiation and Environmental Biophysics*, 46(1), 69-76. doi:10.1007/s00411-006-0081-0
- Paniagua, Jesús M., Montaña Rufo, Antonio Jiménez, Fernando T. Pachón, et Julián Carrero. 2015. "Exposure estimates based on broadband ELF magnetic field measurements versus the ICNIRP multiple frequency rule." *Radiation Protection Dosimetry* 163 (2):173-180. doi: 10.1093/rpd/ncu175.
- Paniagua, Jesús M., Montaña Rufo, Antonio Jiménez, Alicia Antolín, et Jorge Barberá. 2017. "Spectral analysis to assess exposure to extremely low frequency magnetic fields in cars." *The Science of the Total Environment* 584-585:875-881. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.134.
- Park, Jeong-Eun, Young-Kwon Seo, Hee-Hoon Yoon, Chan-Wha Kim, Jung-Keug Park, et Songhee Jeon. 2013. "Electromagnetic fields induce neural differentiation of human bone marrow derived mesenchymal stem cells via ROS mediated EGFR activation." *Neurochemistry International* 62 (4):418-424. doi: 10.1016/j.neuint.2013.02.002.
- Parlett, Lauren E., Joseph D. Bowman, et Edwin van Wijngaarden. 2011. "Evaluation of occupational exposure to magnetic fields and motor neuron disease mortality in a population-based cohort." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 53 (12):1447-1451. doi: 10.1097/JOM.0b013e318237a1d0.

- Parodi, Stefano, Domenico Franco Merlo, Alessandra Ranucci, Lucia Miligi, Alessandra Benvenuti, Roberto Rondelli, Corrado Magnani, Riccardo Haupt, et Setil Working Group. 2014. "Risk of neuroblastoma, maternal characteristics and perinatal exposures: the SETIL study." *Cancer Epidemiology* 38 (6):686-694. doi: 10.1016/j.canep.2014.09.007.
- Patruno, A., P. Amerio, M. Pesce, G. Vianale, S. Di Luzio, A. Tulli, S. Franceschelli, A. Grilli, R. Muraro, et M. Reale. 2010. "Extremely low frequency electromagnetic fields modulate expression of inducible nitric oxide synthase, endothelial nitric oxide synthase and cyclooxygenase-2 in the human keratinocyte cell line HaCat: potential therapeutic effects in wound healing." *The British Journal of Dermatology* 162 (2):258-266. doi: 10.1111/j.1365-2133.2009.09527.x.
- Patruno, A., S. Tabrez, P. Amerio, M. Pesce, G. Vianale, S. Franceschelli, A. Grilli, M. A. Kamal, et M. Reale. 2011. "Kinetic study on the effects of extremely low frequency electromagnetic field on catalase, cytochrome P450 and inducible nitric oxide synthase in human HaCaT and THP-1 cell lines." *CNS & neurological disorders drug targets* 10 (8):936-944.
- Patruno, Antonia, Shams Tabrez, Mirko Pesce, Shazi Shakil, Mohammad A. Kamal, et Marcella Reale. 2015. "Effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) on catalase, cytochrome P450 and nitric oxide synthase in erythro-leukemic cells." *Life Sciences* 121:117-123. doi: 10.1016/j.lfs.2014.12.003.
- Pedersen, Camilla, Elvira V. Bräuner, Naja H. Rod, Vanna Albieri, Claus E. Andersen, Kaare Ulbak, Ole Hertel, Christoffer Johansen, Joachim Schüz, et Ole Raaschou-Nielsen. 2014a. "Distance to high-voltage power lines and risk of childhood leukemia--an analysis of confounding by and interaction with other potential risk factors." *PLOS ONE* 9 (9):e107096. doi: 10.1371/journal.pone.0107096.
- Pedersen, Camilla, Ole Raaschou-Nielsen, Naja Hulvej Rod, Patrizia Frei, Aslak Harbo Poulsen, Christoffer Johansen, et Joachim Schüz. 2014b. "Distance from residence to power line and risk of childhood leukemia: a population-based case-control study in Denmark." *Cancer causes & control: CCC* 25 (2):171-177. doi: 10.1007/s10552-013-0319-5.
- Pedersen, Camilla, Christoffer Johansen, Joachim Schüz, Jørgen H. Olsen, et Ole Raaschou-Nielsen. 2015. "Residential exposure to extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukaemia, CNS tumour and lymphoma in Denmark." *British Journal of Cancer*. doi: 10.1038/bjc.2015.365.
- Percherancier, Y., B. Goudeau, R. Charlet de Sauvage, F. P. de Gannes, E. Haro, A. Hurtier, N. Sojic, I. Lagroye, S. Arbault, et B. Veyret. 2015. "Effects of 50Hz magnetic fields on gap junctional intercellular communication in NIH3T3 cells." *Bioelectromagnetics* 36 (4):287-293. doi: 10.1002/bem.21908.
- Prato, Frank S., John A. Robertson, Dawn Desjardins, Jennifer Hensel, et Alex W. Thomas. 2005. "Daily repeated magnetic field shielding induces analgesia in CD-1 mice." *Bioelectromagnetics* 26 (2):109-117. doi: 10.1002/bem.20056.
- Prato, Frank S., Dawn Desjardins-Holmes, Lynn D. Keenlside, Julia C. McKay, John A. Robertson, et Alex W. Thomas. 2009. "Light alters nociceptive effects of magnetic field shielding in mice: intensity and wavelength considerations." *Journal of The Royal Society Interface* 6 (30):17-28. doi: 10.1098/rsif.2008.0156.
- Prato, F. S., D. Desjardins-Holmes, L. D. Keenlside, J. M. Demoor, J. A. Robertson, R. Z. Stodilka, et A. W. Thomas. 2011. "The detection threshold for extremely low frequency magnetic fields may be below 1000nT-Hz in mice." *Bioelectromagnetics* 32 (7):561-569.
- Preston-Martin, S., J. G. Gurney, J. M. Pogoda, E. A. Holly, et B. A. Mueller. 1996. "Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters. Results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study." *American Journal of Epidemiology* 143 (11):1116-1122.

- Ptitsyna, Natalia, A. Ponzetto, Yu Kopytenko, V. S. Ismagilov, et A. G. Korobeinikov. 2014. "Electric Vehicle Magnetic Fields and Their Biological Relevance." *Journal of Scientific Research and Reports* 3:1753-1770. doi: 10.9734/JSRR/2014/9736.
- Qi, Guangying, Xiaoxu Zuo, Lihua Zhou, Eriko Aoki, Aya Okamura, Mika Watanebe, Haipeng Wang, Qiuhui Wu, Huiling Lu, Handan Tuncel, Hiromitsu Watanabe, Sien Zeng, et Fumio Shimamoto. 2015. "Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) exposure on B6C3F1 mice." *Environmental Health and Preventive Medicine* 20 (4):287-293. doi: 10.1007/s12199-015-0463-5.
- Rageh, M. M., R. H. El-Gebaly, et N. S. El-Bialy. 2012. "Assessment of genotoxic and cytotoxic hazards in brain and bone marrow cells of newborn rats exposed to extremely low-frequency magnetic field." *Journal of Biomedicine and Biotechnology* 2012.
- Rahman, N. A., W. N. Mahadi, et Z. Rasol. 2011. "Evaluation on the potential risk hazards of magnetic field radiated from cast resin transformer electric substation." *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5 (9):150-159.
- Rajkovic, V., M. Matavulj, et O. Johansson. 2010. "Studies on the synergistic effects of extremely low-frequency magnetic fields and the endocrine-disrupting compound atrazine on the thyroid gland." *International Journal of Radiation Biology* 86 (12):1050-1060.
- Rauš, S., V. Selaković, L. Radenović, Z. Prolić, et B. Janać. 2012. "Extremely low frequency magnetic field induced changes in motor behaviour of gerbils submitted to global cerebral ischemia." *Behavioural Brain Research* 228 (2):241-246.
- Rauš, S., V. Selaković, M. Manojlović-Stojanoski, L. Radenović, Z. Prolić, et B. Janać. 2013. "Response of hippocampal neurons and glial cells to alternating magnetic field in gerbils submitted to global cerebral ischemia." *Neurotoxicity Research* 23 (1):79-91.
- Rauš Balind, Snežana, Vesna Selaković, Lidija Radenović, Zlatko Prolić, et Branka Janać. 2014a. "Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) reduces oxidative stress in the brain of gerbils submitted to global cerebral ischemia." *PLOS ONE* 9 (2):e88921. doi: 10.1371/journal.pone.0088921.
- Rauš Balind, Snežana, Milica Manojlović-Stojanoski, Verica Milošević, Dajana Todorović, Ljiljana Nikolić, et Branka Petković. 2014b. "Short- and long-term exposure to alternating magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) affects rat pituitary ACTH cells: Stereological study." *Environmental Toxicology*. doi: 10.1002/tox.22059.
- Reale, Marcella, Mohammad A. Kamal, Antonia Patrino, Erica Costantini, Chiara D'Angelo, Miko Pesce, et Nigel H. Greig. 2014. "Neuronal Cellular Responses to Extremely Low Frequency Electromagnetic Field Exposure: Implications Regarding Oxidative Stress and Neurodegeneration." *PLOS ONE* 9 (8). doi: 10.1371/journal.pone.0104973.
- Reid, A., D. C. Glass, H. D. Bailey, E. Milne, N. H. de Klerk, P. Downie, et L. Fritschi. 2011. "Risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia following parental occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields." *British Journal of Cancer* 105 (9):1409-1413. doi: 10.1038/bjc.2011.365.
- Robertson, John A., Nicole Juen, Jean Théberge, Julie Weller, Dick J. Drost, Frank S. Prato, et Alex W. Thomas. 2010. "Evidence for a dose-dependent effect of pulsed magnetic fields on pain processing." *Neuroscience Letters* 482 (2):160-162. doi: 10.1016/j.neulet.2010.07.024.
- Röösli, Martin, Daniela Jenni, Leeka Kheifets, et Gabor Mezei. 2011. "Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland." *The Science of the Total Environment* 409 (18):3364-3369. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.041.
- Rosen, D. R., T. Siddique, D. Patterson, D. A. Figlewicz, P. Sapp, A. Hentati, D. Donaldson, J. Goto, J. P. O'Regan, et H. X. Deng. 1993. "Mutations in Cu/Zn superoxide dismutase gene are associat

- ed with familial amyotrophic lateral sclerosis." *Nature* 362 (6415):59-62. doi: 10.1038/362059a0.
- Rudant, Jérémie, Laurent Orsi, Florence Menegaux, Arnaud Petit, André Baruchel, Yves Bertrand, Anne Lambilliotte, Alain Robert, Gérard Michel, Geneviève Margueritte, Julie Tandonnet, Françoise Mechinaud, Pierre Bordigoni, Denis Hémon, et Jacqueline Clavel. 2010. "Childhood acute leukemia, early common infections, and allergy: The ESCALE Study." *American Journal of Epidemiology* 172 (9):1015-1027. doi: 10.1093/aje/kwq233.
- Rudant, Jérémie, Tracy Lightfoot, Kevin Y. Urayama, Eleni Petridou, John D. Dockerty, Corrado Magnani, Elizabeth Milne, Logan G. Spector, Lesley J. Ashton, Nikolaos Dessypris, Alice Y. Kang, Margaret Miller, Roberto Rondelli, Jill Simpson, Eftichia Stiakaki, Laurent Orsi, Eve Roman, Catherine Metayer, Claire Infante-Rivard, et Jacqueline Clavel. 2015a. "Childhood acute lymphoblastic leukemia and indicators of early immune stimulation: a Childhood Leukemia International Consortium study." *American Journal of Epidemiology* 181 (8):549-562. doi: 10.1093/aje/kwu298.
- Rudant, Jérémie, Laurent Orsi, Audrey Bonaventure, Stéphanie Goujon-Bellec, André Baruchel, Arnaud Petit, Yves Bertrand, Brigitte Nelken, Marlène Pasquet, Gérard Michel, Laure Saumet, Pascal Chastagner, Stéphane Ducassou, Yves Réguerre, Denis Hémon, et Jacqueline Clavel. 2015b. "ARID5B, IKZF1 and non-genetic factors in the etiology of childhood acute lymphoblastic leukemia: the ESCALE study." *PLOS ONE* 10 (3):e0121348. doi: 10.1371/journal.pone.0121348.
- Ruddle, A. R., L. Low, et A. Vassilev. 2013. "EM-safety: Low Frequency Magnetic Field Exposure in Vehicles with Electrical Powertrains." Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, 2013/08/12/15.
- Saadeldin, I. M., A. M. Fadel, M. M. Z. Hamada, et A. A. El-Badry. 2011. "Effects of exposure to 50 HZ, 1 gauss magnetic field on reproductive traits in male albino rats." *Acta Veterinaria Brno* 80 (1):107-111.
- Safigianni, A. S., A. I. Spyridopoulos, et V. L. Kanas. 2012. "Electric and magnetic field measurements in a high voltage center." *Annals of Occupational Hygiene* 56 (1):18-24.
- Saha, Shreya, Lisa Woodbine, Jackie Haines, Margaret Coster, Nicole Rickett, Lara Barazzuol, Elizabeth Ainsbury, Zenon Sienkiewicz, et Penny Jeggo. 2014. "Increased apoptosis and DNA double-strand breaks in the embryonic mouse brain in response to very low-dose X-rays but not 50 Hz magnetic fields." *Journal of The Royal Society Interface* 11 (100):20140783. doi: 10.1098/rsif.2014.0783.
- Sakhnini, L., S. Al-Ghareeb, S. Khalil, R. Ahmed, A. Abdul Ameer, et A. Kamal. 2013. "Effects of exposure to 50 Hz electromagnetic fields on Morris water-maze performance of prenatal and neonatal mice."
- Salehi, I., K. G. Sani, et A. Zamani. 2013. "Exposure of rats to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) alters cytokines production." *Electromagnetic Biology and Medicine* 32 (1):1-8.
- Salunke, Balwant P., Sudhir N. Umathe, et Jagatpalsingh G. Chavan. 2014a. "Involvement of NMDA receptor in low-frequency magnetic field-induced anxiety in mice." *Electromagnetic Biology and Medicine* 33 (4):312-326. doi: 10.3109/15368378.2013.839453.
- Salunke, B. P., S. N. Umathe, et J. G. Chavan. 2014b. "Experimental evidence for involvement of nitric oxide in low frequency magnetic field induced obsessive compulsive disorder-like behavior." *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 122:273-278. doi: 10.1016/j.pbb.2014.04.007.
- Salvan, Alberto, Alessandra Ranucci, Susanna Lagorio, Corrado Magnani, et Setil Research Group. 2015. "Childhood leukemia and 50 Hz magnetic fields: findings from the Italian SETIL case-control study." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (2):2184-2204. doi: 10.3390/ijerph120202184.

- Saxe, Michael D., Fortunato Battaglia, Jing-Wen Wang, Gael Malleret, Denis J. David, James E. Monckton, A. Denise R. Garcia, Michael V. Sofroniew, Eric R. Kandel, Luca Santarelli, René Hen, et Michael R. Drew. 2006. "Ablation of hippocampal neurogenesis impairs contextual fear conditioning and synaptic plasticity in the dentate gyrus." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (46):17501-17506. doi: 10.1073/pnas.0607207103.
- Schüz, Joachim. 2011. "Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer: Update of the epidemiological evidence." *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 107 (3):339-342. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2011.09.008.
- Seelen, Meinie, Roel C. H. Vermeulen, Levien S. van Dillen, Anneke J. van der Kooi, Anke Huss, Marianne de Visser, Leonard H. van den Berg, et Jan H. Veldink. 2014. "Residential exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and the risk of ALS." *Neurology* 83 (19):1767-1769. doi: 10.1212/WNL.0000000000000952.
- Seifirad, Soroush, Shahrokh Farzampour, Mitra Nourbakhsh, Mahsa Mohammad Amoli, Maryam Razzaghy-Azar, et Bagher Larijani. 2014. "Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on paraoxonase serum activity and lipid peroxidation metabolites in rat." *Journal of Diabetes and Metabolic Disorders* 13 (1):85. doi: 10.1186/s40200-014-0085-2.
- Selaković, V., S. Rauš Balind, L. Radenović, Z. Prolić, et B. Janać. 2013. "Age-Dependent Effects of ELF-MF on Oxidative Stress in the Brain of Mongolian Gerbils." *Cell Biochemistry and Biophysics* 66 (3):513-521. doi: 10.1007/s12013-012-9498-z.
- Sermage-Faure, C., C. Demoury, J. Rudant, S. Goujon-Bellec, A. Guyot-Goubin, F. Deschamps, D. Hemon, et J. Clavel. 2013. "Childhood leukaemia close to high-voltage power lines – the Geocap study, 2002–2007." *British Journal of Cancer* 108 (9):1899-1906. doi: 10.1038/bjc.2013.128.
- Sert, C., et M. Deniz. 2011. "Total antioxidant capacity, total oxidant status and oxidative stress index in rats exposed to extremely low frequency magnetic field." *Asian Journal of Chemistry* 23 (5):1925-1928.
- Shafiei, S. A., S. M. Firoozabadi, K. Rasoulzadeh Tabatabaie, et M. Ghabaee. 2012. "Study of the frequency parameters of EEG influenced by zone-dependent local ELF-MF exposure on the human head." *Electromagnetic Biology and Medicine* 31 (2):112-121. doi: 10.3109/15368378.2011.624658.
- Shafiei, S. A., S. M. Firoozabadi, K. Rasoulzadeh Tabatabaie, et M. Ghabaee. 2014. "Investigation of EEG changes during exposure to extremely low-frequency magnetic field to conduct brain signals." *Neurological Sciences: Official Journal of the Italian Neurological Society and of the Italian Society of Clinical Neurophysiology* 35 (11):1715-1721. doi: 10.1007/s10072-014-1819-0.
- Shin, Eun-Joo, Xuan-Khanh Thi Nguyen, Thuy-Ty Lan Nguyen, Diem-Thu Pham, et Hyoung-Chun Kim. 2011. "Exposure to extremely low frequency magnetic fields induces fos-related antigen-immunoreactivity via activation of dopaminergic d1 receptor." *Experimental neurobiology* 20 (3):130-136. doi: 10.5607/en.2011.20.3.130.
- Sienkiewicz, Zenon, Schüz Joachim, Poulsen Aslak Harbo, Cardis Elisabeth. 2010. "Risk analysis of human exposure to electromagnetic fields (revised)." *European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (Efhran)*. Deliverable Report D2 of EHFRAN project
- Sitaram, Ranganatha, Tomas Ros, Luke Stoeckel, Sven Haller, Frank Scharnowski, Jarrod Lewis-Peacock, Nikolaus Weiskopf, Maria Laura Blefari, Mohit Rana, Ethan Oblak, Niels Birbaumer, et James Sulzer. 2017. "Closed-loop brain training: the science of neurofeedback." *Nature Reviews. Neuroscience* 18 (2):86-100. doi: 10.1038/nrn.2016.164.

- Slusky, Danna A., Monique Does, Catherine Metayer, Gabor Mezei, Steve Selvin, et Patricia A. Buffler. 2014. "Potential role of selection bias in the association between childhood leukemia and residential magnetic fields exposure: A population-based assessment." *Cancer Epidemiology* 38 (3):307-313. doi: 10.1016/j.canep.2014.02.010.
- Sohrabi, Mohammad-Reza, Termeh Tarjoman, Alireza Abadi, et Parvin Yavari. 2010. "Living near overhead high voltage transmission power lines as a risk factor for childhood acute lymphoblastic leukemia: a case-control study." *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP* 11 (2):423-427.
- Song, T., L. Cui, K. Gaa, L. Feffer, S. Taulu, R. R. Lee, et M. Huang. 2009. "Signal space separation algorithm and its application on suppressing artifacts caused by vagus nerve stimulation for magnetoencephalography recordings." *Journal of Clinical Neurophysiology* 26 (6):392-400.
- Sorahan, T. 2014a. "Magnetic fields and brain tumour risks in UK electricity supply workers." *Occupational Medicine (Oxford, England)* 64 (3):157-165. doi: 10.1093/occmed/kqu003.
- Sorahan, T. 2014b. "Magnetic fields and leukaemia risks in UK electricity supply workers." *Occupational Medicine (Oxford, England)* 64 (3):150-156. doi: 10.1093/occmed/kqu002.
- Sorahan, T., et N. Mohammed. 2014. "Neurodegenerative disease and magnetic field exposure in UK electricity supply workers." *Occupational Medicine (Oxford, England)* 64 (6):454-460. doi: 10.1093/occmed/kqu105.
- SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2013. "Recent Research on EMF and Health Risk - Eighth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2013." 2013 : 19.
- SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2014. "Recent Research on EMF and Health Risk - Ninth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2014." 2014 : 16.
- SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2015. "Recent Research on EMF and Health Risk - Tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2015." 2015 : 19.
- SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2016. "Recent Research on EMF and Health Risk - Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2016. Including Thirteen years of electromagnetic field research monitored by SSM's Scientific Council on EMF and health: How has the evidence changed over time?" 2016 : 15.
- Straume, Aksel, Anders Johnsson, et Gunnhild Oftedal. 2008. "ELF-magnetic flux densities measured in a city environment in summer and winter." *Bioelectromagnetics* 29 (1):20-28. doi: 10.1002/bem.20357.
- Struchen, Benjamin, Ilaria Liorni, Marta Parazzini, Stephanie Gängler, Paolo Ravazzani, et Martin Röösli. 2015. "Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. doi: 10.1038/jes.2015.80.
- Sun, Chengtao, Huiming Yu, Xingwen Wang, et Junqing Han. 2012. "A pilot study of extremely low-frequency magnetic fields in advanced non-small cell lung cancer: Effects on survival and palliation of general symptoms." *Oncology letters* 4 (5):1130-1134. doi: 10.3892/ol.2012.867.
- Sun, W., Q. Tan, Y. Pan, Y. Fu, H. Sun, et H. Chiang. 2010. "Effects of 50-Hz magnetic field exposure on hormone secretion and apoptosis-related gene expression in human first trimester villous trophoblasts in vitro." *Bioelectromagnetics* 31 (7):566-572. doi: 10.1002/bem.20596.

- Swanson, John. 2013. "Residential mobility of populations near UK power lines and implications for childhood leukaemia." *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection* 33 (3):N9-14. doi: 10.1088/0952-4746/33/3/N9.
- Swanson, J., K. J. Bunch, T. J. Vincent, et M. F. G. Murphy. 2014. "Childhood cancer and exposure to corona ions from power lines: an epidemiological test." *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection* 34 (4):873-889. doi: 10.1088/0952-4746/34/4/873.
- Swedish Work environment authority. 2005. "Low-frequency electrical and magnetic fields - the precautionary principle for national authorities - guidance for decision-makers."
- Szemerszky, R., D. Zelena, I. Barna, et G. Bárdos. 2010. "Stress-related endocrinological and psychopathological effects of short- and long-term 50 Hz electromagnetic field exposure in rats." *Brain Research Bulletin* 81 (1):92-99. doi: 10.1016/j.brainresbull.2009.10.015.
- Tabrizi, Maral Mazloomi, et Sepideh Arbabi Bidgoli. 2015. "Increased risk of childhood acute lymphoblastic leukemia (ALL) by prenatal and postnatal exposure to high voltage power lines: a case control study in Isfahan, Iran." *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP* 16 (6):2347-2350.
- Tabrizi, Maral Mazloomi, et Seyed Ahmad Hosseini. 2015. "Role of Electromagnetic Field Exposure in Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia and No Impact of Urinary Alpha-Amylase - a Case Control Study in Tehran, Iran." *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP* 16 (17):7613-7618.
- Talibov, Madar, Monica Guxens, Eero Pukkala, Anke Huss, Hans Kromhout, Pauline Slottje, Jan Ivar Martinsen, Kristina Kjaerheim, Pär Sparén, Elisabete Weiderpass, Laufey Tryggvadottir, Sanni Uuksulainen, et Roel Vermeulen. 2015. "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and electrical shocks and acute myeloid leukemia in four Nordic countries." *Cancer causes & control: CCC* 26 (8):1079-1085. doi: 10.1007/s10552-015-0600-x.
- Teepen, Jop C., et Jos A. A. M. van Dijck. 2012. "Impact of high electromagnetic field levels on childhood leukemia incidence." *International Journal of Cancer* 131 (4):769-778. doi: 10.1002/ijc.27542.
- Tehranipour, M., et M. Kafaei. 2010. "Effects of exposure to extremely low-frequency magnetic field of 4 μ T intensity on spatial memory and learning in mice." *Journal of Biological Sciences* 10 (1):67-70.
- Tell, R. a, G. Sias, J. Smith, J. Sahl, et R. Kavet. 2013. "ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles." *Bioelectromagnetics* 34 (2):156-161. doi: 10.1002/bem.21730.
- Tell, Richard A., et Robert Kavet. 2016. "Electric and magnetic fields <100 kHz in electric and gasoline-powered vehicles." *Radiation Protection Dosimetry* 172 (4):541-546. doi: 10.1093/rpd/ncv533.
- Teşneli, N. B., et A. Y. Teşneli. 2014. "Occupational exposure to electromagnetic fields of uninterruptible power supply industry workers." *Radiation Protection Dosimetry* 162 (3):289-298. doi: 10.1093/rpd/nct340.
- Thibault, Robert T., Michael Lifshitz, et Amir Raz. 2016. "The self-regulating brain and neurofeedback: Experimental science and clinical promise." *Cortex* 74:247-261. doi: 10.1016/j.cortex.2015.10.024.
- Thuróczy, György, Gábor Jánossy, Noémi Nagy, József Bakos, Judit Szabó, et Gábor Mezei. 2008. "Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary." *Radiation Protection Dosimetry* 131 (4):469-473. doi: 10.1093/rpd/ncn199.

- Tiwari, Ravindra, N. K. Lakshmi, S. C. Bhargava, et Y. R. Ahuja. 2015. "Epinephrine, DNA integrity and oxidative stress in workers exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMFs) at 132 kV substations." *Electromagnetic Biology and Medicine* 34 (1):56-62. doi: 10.3109/15368378.2013.869755.
- Tomitsch, J., E. Dechant, et W. Frank. 2010. "Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in Lower Austria." *Bioelectromagnetics* 31 (3):200-208.
- Tomitsch, J., et E. Dechant. 2012. "Trends in residential exposure to electromagnetic fields from 2006 to 2009." *Radiation Protection Dosimetry* 149 (4):384-391. doi: 10.1093/rpd/ncr325.
- Touitou, Yvan, et Brahim Selmaoui. 2012. "The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system." *Dialogues in Clinical Neuroscience* 14 (4):381-399.
- Trillo, María Ángeles, María Antonia Martínez, María Antonia Cid, et Alejandro Úbeda. 2013. "Retinoic acid inhibits the cytoproliferative response to weak 50-Hz magnetic fields in neuroblastoma cells." *Oncology Reports* 29 (3):885-894. doi: 10.3892/or.2012.2212.
- Turner, Michelle C., Geza Benke, Joseph D. Bowman, Jordi Figuerola, Sarah Fleming, Martine Hours, Laurel Kincl, Daniel Krewski, Dave McLean, Marie-Elise Parent, Lesley Richardson, Siegal Sadetzki, Klaus Schläefer, Brigitte Schlehofer, Joachim Schüz, Jack Siemiatycki, Martie van Tongeren, et Elisabeth Cardis. 2014. "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and brain tumor risks in the INTEROCC study." *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology* 23 (9):1863-1872. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-14-0102.
- Úbeda, Alejandro, María Antonia Martínez, María Antonia Cid, Lucía Chacón, María A. Trillo, et Jocelyne Leal. 2011. "Assessment of occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields in hospital personnel." *Bioelectromagnetics* 32 (5):378-387. doi: 10.1002/bem.20644.
- Udroiu, Ion, Antonio Antoccia, Caterina Tanzarella, Livio Giuliani, Francesca Pacchierotti, Eugenia Cordelli, Patrizia Eleuteri, Paola Villani, et Antonella Sgura. 2015. "Genotoxicity Induced by Foetal and Infant Exposure to Magnetic Fields and Modulation of Ionising Radiation Effects." *PLOS ONE* 10 (11):e0142259. doi: 10.1371/journal.pone.0142259.
- Ulku, Refik, Mehmet Zulkuf Akdag, Sait Erdogan, Zeki Akkus, et Suleyman Dasdag. 2011. "Extremely low-frequency magnetic field decreased calcium, zinc and magnesium levels in costa of rat." *Biological Trace Element Research* 143 (1):359-367. doi: 10.1007/s12011-010-8855-2.
- van der Mark, Marianne, Roel Vermeulen, Peter C. G. Nijssen, Wim M. Mulleners, Antonetta M. G. Sas, Teus van Laar, Hans Kromhout, et Anke Huss. 2015. "Extremely low-frequency magnetic field exposure, electrical shocks and risk of Parkinson's disease." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 88 (2):227-234. doi: 10.1007/s00420-014-0949-2.
- Vergara, Ximena, Leeka Kheifets, Sander Greenland, Sona Oksuzyan, Yong-Sung Cho, et Gabor Mezei. 2013. "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and neurodegenerative disease: a meta-analysis." *Journal of occupational and environmental medicine / American College of Occupational and Environmental Medicine* 55 (2):135-146. doi: 10.1097/JOM.0b013e31827f37f8.
- Vergara, Ximena, Gabor Mezei, et Leeka Kheifets. 2015. "Case-control study of occupational exposure to electric shocks and magnetic fields and mortality from amyotrophic lateral sclerosis in the US, 1991-1999." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 25 (1):65-71. doi: 10.1038/jes.2014.39.

- Vijayalaxmi, et T. J. Prihoda. 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)." *International Journal of Radiation Biology* 85 (3):196-213.
- Villarini, Milena, Maria Vittoria Ambrosini, Massimo Moretti, Luca Dominici, Elena Taha, Danilo Piobbico, Cristiana Gambelunghe, et Giuseppina Mariucci. 2013. "Brain hsp70 expression and DNA damage in mice exposed to extremely low frequency magnetic fields: A dose-response study." *International Journal of Radiation Biology* 89 (7):562-570. doi: 10.3109/09553002.2013.782449.
- Villarini, M., L. Dominici, C. Fatigoni, S. Levorato, S. Vannini, S. Monarca, et Massimo Moretti. 2015. "Primary DNA damage in welders occupationally exposed to extremely-low-frequency magnetic fields (ELF-MF)." *Annali Di Igiene: Medicina Preventiva E Di Comunità* 27 (3):511-519.
- Vistnes, A. I., G. B. Ramberg, L. R. Bjørnevik, T. Tynes, et T. Haldorsen. 1997. "Exposure of children to residential magnetic fields in Norway: is proximity to power lines an adequate predictor of exposure?" *Bioelectromagnetics* 18 (1):47-57.
- Wen, Jian, Shulian Jiang, Zhiqiang Chen, Wei Zhao, Yongxiang Yi, Ruili Yang, et Baoan Chen. 2014. "Apoptosis selectively induced in BEL-7402 cells by folic acid-modified magnetic nanoparticles combined with 100 Hz magnetic field." *International Journal of Nanomedicine* 9:2043-2050. doi: 10.2147/IJN.S60457.
- Wertheimer, N., et E. Leeper. 1979. "Electrical wiring configurations and childhood cancer." *American Journal of Epidemiology* 109 (3):273-284.
- Wilson, James W., Jackie Haines, Zenon Sienkiewicz, et Yuri E. Dubrova. 2015. "The effects of extremely low frequency magnetic fields on mutation induction in mice." *Mutation Research* 773:22-26. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2015.01.014.
- Woodbine, Lisa, Jackie Haines, Margaret Coster, Lara Barazzuol, Elizabeth Ainsbury, Zenon Sienkiewicz, et Penny Jeggo. 2015. "The rate of X-ray-induced DNA double-strand break repair in the embryonic mouse brain is unaffected by exposure to 50 Hz magnetic fields." *International Journal of Radiation Biology* 91 (6):495-499. doi: 10.3109/09553002.2015.1021963.
- Wünsch-Filho, Victor, Daniele M. Pelissari, Flávio E. Barbieri, Leonel Sant'Anna, Cláudia T. de Oliveira, Juliana F. de Mata, Luiz G. Tone, Maria Lúcia de M. Lee, Maria Lydia M. de Andréa, Paula Bruniera, Sidnei Epelman, Vicente Odone Filho, et Leeka Kheifets. 2011. "Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in São Paulo, Brazil." *Cancer Epidemiology* 35 (6):534-539. doi: 10.1016/j.canep.2011.05.008.
- Yitzhak, Nir-Mordechay, Ronen Hareuveny, Shaiela Kandel, et Raphael Ruppim. 2012. "Time dependence of 50 Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations." *Radiation Protection Dosimetry* 149 (2):191-195. doi: 10.1093/rpd/ncr226.
- Yoon, H. E., J. S. Lee, S. H. Myung, et Y. S. Lee. 2014. "Increased γ -H2AX by exposure to a 60-Hz magnetic fields combined with ionizing radiation, but not hydrogen peroxide, in non-tumorigenic human cell lines." *International Journal of Radiation Biology* 90 (4):291-298. doi: 10.3109/09553002.2014.887866.
- Zandi Mehran, Y., M. Firoozabadi, et R. Rostami. 2013. "Brain Inconspicuous Effect by Local Sinusoidal Extremely Low Frequency Magnetic Exposure Based on Wavelet Packet Analysis: Innovation in Online Passive Neurofeedback Therapy by the Neuro-LSELF System." *Journal of Neurotherapy* 17 (4):226-247. doi: 10.1080/10874208.2013.854086.
- Zandi Mehran, Y., M. Firoozabadi, et R. Rostami. 2015. "Improvement of neurofeedback therapy for improved attention through facilitation of brain activity using local sinusoidal extremely low frequency magnetic field exposure." *Clinical EEG and Neuroscience* 46 (2):100-112. doi: 10.1177/1550059414524403.

- Zhang, Cheng, Yue Li, Chao Wang, Ruili Lv, et Tao Song. 2013. "Extremely low-frequency magnetic exposure appears to have no effect on pathogenesis of Alzheimer's disease in aluminum-overloaded rat." *PLOS ONE* 8 (8):e71087. doi: 10.1371/journal.pone.0071087.
- Zhang, G., X. Liu, S. Wei, C. Yang, J. Zhang, et T. Song. 2013. "Large power frequency magnetic field exposure system for long term animal experiments." *Gaodiyana Jishu/High Voltage Engineering* 39 (1):149-155.
- Zhang, Yemao, Xingfa Liu, Jiangong Zhang, et Ni Li. 2015. "Short-term effects of extremely low frequency electromagnetic fields exposure on Alzheimer's disease in rats." *International Journal of Radiation Biology* 91 (1):28-34. doi: 10.3109/09553002.2014.954058.
- Zhao, Chunmei, E. Matthew Teng, Robert G. Summers, Guo-li Ming, et Fred H. Gage. 2006. "Distinct Morphological Stages of Dentate Granule Neuron Maturation in the Adult Mouse Hippocampus." *Journal of Neuroscience* 26 (1):3-11. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3648-05.2006.
- Zhao, Longyu, Xiaodong Liu, Chunpeng Wang, Kangkang Yan, Xuejun Lin, Shuang Li, Honghong Bao, et Xin Liu. 2014a. "Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: A meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls." *Leukemia Research* 38 (3):269-274. doi: 10.1016/j.leukres.2013.12.008.
- Zhao, G., X. Lin, M. Zhou, et J. Zhao. 2014b. "Relationship between exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and breast cancer risk: a meta-analysis." *European Journal of Gynaecological Oncology* 35 (3):264-269.
- Zhou, Hongjie, Guangdi Chen, Chunjing Chen, Yunxian Yu, et Zhengping Xu. 2012. "Association between extremely low-frequency electromagnetic fields occupations and amyotrophic lateral sclerosis: a meta-analysis."
- Zhu, Huang, Jie Wang, Jiefeng Cui, et Xianqun Fan. 2014. "Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on human fetal scleral fibroblasts." *Toxicology and Industrial Health*:0748233714545837. doi: 10.1177/0748233714545837.

11.2 Normes

- IEC 61786-2:2014 2014. Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings.
- NF EN 61786-1. 2014. Mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1Hz à 100kHz dans leur rapport à l'exposition humaine. Partie 1 : Exigences applicables aux instruments de mesure. : AFNOR.
- NF X 50-110. 2003. Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise.
- UTE C99-132. 2010. Protocole pour la mesure in situ des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité.

11.3 Législation et réglementation

- Arrêté du 23 avril 2012 portant application de l'article 26 du décret n° 2011-1697 du 1er décembre 2011 relatif aux ouvrages des réseaux publics d'électricité et des autres réseaux d'électricité et au dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques. 2012//23/avril.
- Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs

électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. 2002//03/mai.

Décret n° 2011-1697 du 1er décembre 2011 relatif aux ouvrages des réseaux publics d'électricité et des autres réseaux d'électricité et au dispositif de surveillance et de contrôle des ondes électromagnétiques. 2011.

Décret n° 2013-118 du 1er février 2013 relatif à la protection des animaux utilisés à des fins scientifiques

Décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. 2016//03/août.

Directive n°2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). 2004.

Directive n°2013/35/UE du 26/06/13 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE | SNA CEM. 2013.

Guide non contraignant de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la directive 2013/35/UE «Champs électromagnétiques» Volume 1 — Guide pratique. 2015.

Instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité. 2013.

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement. 2010//12/juillet.

Recommandation du Conseil n°1999/519/CE du 12 juillet 1999, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). 31999H0519. 1999/07/30/.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

COURRIER ARRIVE

27 FEV. 2013

DIRECTION GENERALE



MINISTÈRE DES AFFAIRES
SOCIALES ET DE LA SANTÉ

Direction générale de la santé

MINISTÈRE DU TRAVAIL, DE
L'EMPLOI, DE LA FORMATION
PROFESSIONNELLE ET DU
DIALOGUE SOCIAL

Direction générale du travail

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

Direction générale de la prévention
des risques

Direction générale de l'énergie et du
climat

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE
L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA
FORÊT

Direction générale de l'alimentation

Direction générale des politiques agricole,
agroalimentaire et des territoires

Paris le 22 FEV. 2013

Le Directeur général de la santé
Le Directeur général du travail
Le Directeur général de l'énergie et du climat
La Directrice générale de la prévention des
risques
Le Directeur général de l'alimentation
Le Directeur général des politiques agricole,
agroalimentaire et des territoires

à

Monsieur le Directeur général de l'Agence
Nationale de Sécurité Sanitaire, alimentation,
environnement, travail
253 Avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort

Objet : mise à jour de l'expertise relative aux champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences

Suite à la saisine « Synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences » du 25 juin 2008, l'ANSES a rendu un avis le 6 avril 2010.

Depuis cette date, plusieurs études scientifiques et rapports de synthèse ont été publiés.

Dans ce contexte, conformément à la feuille de route de la transition écologique et au programme de travail de l'agence pour 2013, nous vous demandons de :

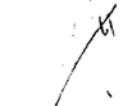
- 1) Approfondir l'expertise scientifique relative aux conséquences sur la santé animale et les performances zootechniques en vue d'une publication du rapport d'expertise à échéance de la fin de l'année 2013 ;
- 2) Procéder d'ici à la mi-2014 à une mise à jour de l'ensemble de l'expertise scientifique sur ce sujet, concernant aussi bien la population générale que les travailleurs

Concernant les études en cours, nous vous invitons, notamment, à prendre en compte l'étude de l'INSERM, Géocap, dont l'objectif est d'étudier de façon systématique le rôle dans les cancers de l'enfant de plusieurs expositions environnementales (dont les champs électromagnétiques des lignes THT) estimées à l'adresse

géocodée du domicile de l'enfant au moment du diagnostic et dont les premiers résultats devraient être communiqués prochainement

Vous voudrez bien nous faire parvenir dans les 2 mois une note d'étape sur l'organisation de vos travaux.

**Le Directeur général
de la santé**



Jean-Yves Grall

**Le Directeur général de
l'énergie et du climat**



Laurent Michel

**Le Directeur Général de
l'alimentation**



Patrick Dehaumont

Le Directeur général du travail



Jean-Denis Combrexelle

**La Directrice générale de la
prévention des risques**



Patricia Blanc

**Le Directeur général des
politiques agricole,
agroalimentaire et des
territoires**



Eric Allain

Annexe 2 : Rappels de physique

Avant d'aborder la notion d'exposition aux champs électromagnétiques, nous présentons en quelques mots les grandeurs mises en jeu dans la majorité des phénomènes qui se produisent à notre échelle, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques et qui sont dus à la force d'interaction électromagnétique. Cette interaction qui s'exerce entre les particules et les corps chargés est décrite par le champ électromagnétique qui correspond à une loi de force à très longue portée donnant lieu, à l'échelle macroscopique, à des effets notables.

Le champ électromagnétique est, quant à lui, associé à l'existence simultanée de deux champs vectoriels⁷¹ : le champ électrique **E** et le champ magnétique **H**. Bien que ces deux grandeurs soient intimement liées avec une origine commune (**E** est associé à l'existence d'une charge électrique et **H** au mouvement de cette charge), elles ont néanmoins des propriétés différentes dépendant de leur fréquence de variation. Enfin, l'intensité du champ électrique s'exprime en volts/mètre (V/m), tandis que celle du champ magnétique s'exprime en ampères/mètre (A/m). Cependant, on utilise souvent la grandeur **B** (induction magnétique ou densité de flux magnétique) qui ne diffère du champ **H**, dans les matériaux non magnétiques, que par une constante de proportionnalité μ_0 qui est la perméabilité magnétique. Dans ce cas, **B** s'exprime en tesla (T).

L'action des champs électrique et magnétique sur les objets dépend de la nature statique ou variable de ces champs ainsi que de la nature (conducteur ou isolant) de l'objet. Les champs électromagnétiques ont des fréquences s'étendant sur un très large spectre, des champs statiques (0 Hz) aux rayonnements gamma (10^{23} Hz), en passant par le spectre visible qui se situe autour de fréquences de l'ordre de 10^{14} Hz. Ainsi, dans le domaine des champs électromagnétiques non ionisants, dans les matériaux conducteurs, quelle que soit la nature statique ou variable du champ électrique, celui-ci produira un courant, dit de conduction, en exerçant une force sur les particules chargées. En revanche, seul un champ électrique variable peut produire un courant, dit de déplacement, dans les matériaux isolants. De même pour le champ magnétique, seul un champ magnétique variable pourra créer une force électromotrice aux bornes d'un conducteur et donc un champ électrique qui donnera lieu à un courant induit. Les champs magnétiques statiques comme le champ magnétique terrestre ne sont donc pas générateurs de courants induits dans les objets et notamment le corps humain. Ce dernier étant considéré comme un bon conducteur (impédance de l'ordre de 1,5 k Ω en moyenne), il sera parcouru par un courant à la même fréquence (par exemple 50 Hz) que celle du champ électrique ou magnétique ambiant. À cette fréquence (50 Hz), le champ électrique externe ne pénètre que très partiellement le corps (quelques mV/m dans le corps pour un champ électrique externe de quelques kV/m) engendrant des courants superficiels et un courant résiduel à l'intérieur du corps (Icnirp, 1998). Le champ magnétique externe variable n'est que très légèrement perturbé par la présence du corps et produit des courants induits qui restent néanmoins bien en deçà des valeurs des courants générés par le corps humain (pour 0,15 mT à 50 Hz, les courants induits seront environ 5 000 fois plus faibles que les courants naturels).

Dans le cadre de ce rapport, la gamme des champs basses fréquences considérés est définie par le domaine fréquentiel suivant : $0 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ kHz}$.

⁷¹ Une charge électrique crée un champ électrique, en tout point de l'espace, proportionnel à la charge Q qui le crée et décroît comme l'inverse du carré de la distance r séparant cette charge de l'endroit où le champ est mesuré : $E = k Q / r^2$ où k est une constante.

Le champ magnétique est directement proportionnel au courant électrique I associé au mouvement de la charge. Son intensité est inversement proportionnelle à la distance r séparant l'endroit où le courant électrique I se déplace, de l'endroit où le champ est mesuré.

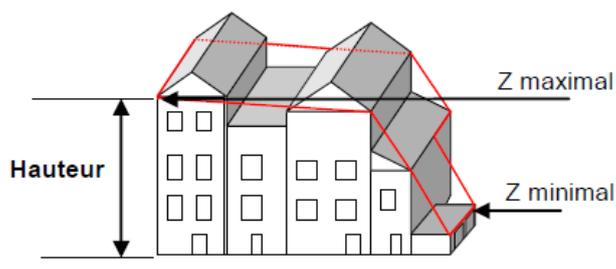
Annexe 3 : Estimation de la population dans le bâti résidentiel

Le bâti résidentiel a été extrait du bâti indifférencié de la BD Topo® V2.1 de l'IGN et d'ESRI France selon plusieurs étapes. Dans un premier temps, une intersection entre le bâti indifférencié⁷² et les surfaces d'activités a permis d'isoler le bâti lié aux activités (n = 586 794). Celui-ci a ensuite été retiré du bâti indifférencié par différence symétrique afin d'obtenir le bâti résidentiel (n = 31 952 303). L'effectif de la population vivant dans chaque bâtiment résidentiel n'est pas une donnée disponible, et a fait l'objet d'une estimation selon deux échelles : le carroyage de l'Insee d'une part, selon la géographie en vigueur en novembre 2013, et les IRIS⁷³ d'autre part, selon la géographie en vigueur au 1^{er} janvier 2012 à partir du recensement de la population de 2010. Les bâtiments ont par conséquent été préalablement découpés selon le contour de ces deux entités (n = 33 881 932).

Les données carroyées au 200 m sont diffusées par l'Insee. Les estimations de population sont fondées sur les revenus fiscaux localisés au 31/12/2010 et sur les données sur la taxe d'habitation au 1/01/2011. L'ensemble de la documentation concernant les données carroyées au 200 m est disponible librement sur le site internet de l'Insee (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2520034>).

L'effectif de la population au sein du bâti a été estimé proportionnellement à sa surface et à son nombre d'étages. Ce dernier, absent de la BD Topo®, a été déduit de la hauteur du bâtiment comme suit (Figure 23) :

Figure 23 : illustration de la hauteur des bâtiments de la BD Topo



Soient :

- h , la hauteur du bâti (en mètre) ;
- e , le nombre d'étages estimé du bâti ;
- s , la surface du bâti ;

si $h < 5$,

$$e = 1$$

si $h \geq 5$,

$$e = \frac{h}{2.5}$$

Soient :

c , les éléments de l'ensemble C constitué des carreaux issus du carroyage : $C = \{c_1, \dots, c_{nc}\}$ avec $nc = 2\,278\,213$;

i , les éléments de l'ensemble I constitué des IRIS : $I = \{i_1, \dots, i_{ni}\}$ avec $ni = 50\,195$;

⁷² L'ensemble des bâtiments de France et leurs contours sont représentés par une forme géométrique

⁷³ L'IRIS, ou Ilots Regroupés pour l'Information Statistique est un découpage du territoire en mailles de taille homogène développé par l'Insee.

b , les éléments de l'ensemble B constitué des bâtis b : $B = \{b_1, \dots, b_{nb}\}$ avec $nb = 33\ 881\ 932$.

Pour chaque bâti b inclus dans l'IRIS i et le carreau c , la population pour la tranche d'âge a a été estimée par la relation suivante :

$$p_{a,b \in i,c} = \frac{e_b \times s_b}{SE_{i \text{ ou } c}} \times p_{a,i \text{ ou } c}$$

Avec

- e_b , le nombre d'étages du bâti b
- s_b , la surface du bâti b
- $SE_{i \text{ ou } c} = \sum_{b \in i \text{ ou } c} e_b \times s_b$
- $p_{a,i \text{ ou } c}$, l'effectif de la population à l'échelle de l'iris ou du carroyage pour la tranche d'âge a .

Où a appartient à :

{'population totale', '0-3 ans', '4-5 ans', '6-10 ans', '11-14 ans', '15-17 ans', '25 ans et plus', '65 ans et plus'} lorsque l'estimation est effectuée à partir des données au carroyage.

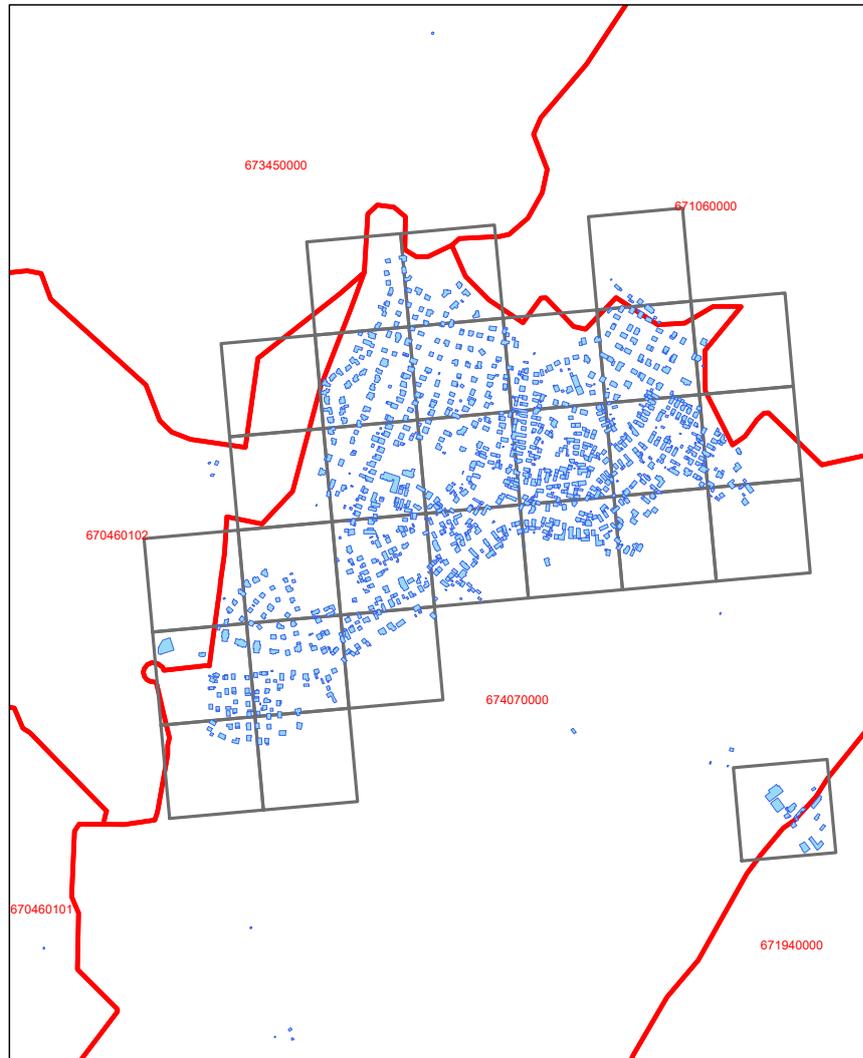


Illustration du carroyage & des bâtiments résidentiels en Alsace

- Bâti résidentiel
- Carroyage Insee
- Contours Iris Alsace



Sources : BD TOPO®, IGN & ESRI France. Contours IRIS®, IGN & ESRI France. Carroyage Insee.
 Réalisation : L. LAUNAY, U1086 INSERM "Cancers & Préventions" - IDEES Caen UMR 6266, Oct 2016.

Figure 24 : estimation de la population dans le bâti

Annexe 4 : Estimation du nombre d'individus vivant dans des logements à proximité des lignes à haute tension selon les régions et différents scénarios d'exposition

Scénario 0,1 µT

Tableau 36 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,1 µT)

Région	Bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%*	N (en milliers)	%*	N	%*
Alsace	1 206 281	11,4	0,642 %	2	0,623 %	479	0,573 %
Aquitaine	2 376 617	45,7	1,457 %	8,3	1,570 %	2 093	1,555 %
Auvergne	980 769	13,9	1,067 %	2,5	1,173 %	595	1,098 %
Basse-Normandie	1 126 306	7	0,491 %	1,4	0,546 %	342	0,525 %
Bourgogne	1 126 653	10,5	0,660 %	1,8	0,666 %	457	0,665 %
Bretagne	2 333 841	15	0,481 %	2,9	0,505 %	726	0,492 %
Centre-Val de Loire	1 903 063	16,6	0,663 %	3,1	0,680 %	760	0,637 %
Champagne-Ardenne	663 284	7,8	0,603 %	1,4	0,594 %	341	0,552 %
Corse	198 514	2,6	0,969 %	0,4	0,962 %	106	1,026 %
Franche-Comté	665 253	14,8	1,293 %	2,8	1,314 %	687	1,219 %
Haute-Normandie	1 142 400	9,3	0,516 %	2	0,576 %	521	0,567 %
Île-de-France	2 546 397	75,9	0,645 %	17,5	0,727 %	4 818	0,706 %
Languedoc-Roussillon	1 689 846	16	0,616 %	3,2	0,708 %	801	0,693 %
Limousin	661 175	5,6	0,800 %	0,9	0,833 %	238	0,859 %
Lorraine	1 304 449	22,9	1,013 %	4,3	1,078 %	1 067	1,036 %
Midi-Pyrénées	1 990 339	31,7	1,144 %	5,7	1,194 %	1 388	1,119 %
Nord-Pas-de-Calais	2 404 448	39,2	0,987 %	8	0,995 %	2 036	0,948 %
Provence-Alpes-Côte d'Azur	2 202 429	63,7	1,301 %	12	1,410 %	2 817	1,272 %
Pays de la Loire	2 587 704	32,2	0,918 %	6,4	0,936 %	1 658	0,920 %
Picardie	1 186 142	7,3	0,387 %	1,5	0,401 %	356	0,363 %
Poitou-Charentes	1 721 499	9,2	0,533 %	1,6	0,549 %	362	0,491 %
Rhône-Alpes	2 731 057	76,5	1,252 %	15,7	1,330 %	3848	1,216 %

* en pourcentage de la population régionale de la tranche d'âge

Scénario 0,2 µT**Tableau 37 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,2 µT)**

Région	Bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%	N (en milliers)	%*	N	%*
Alsace	4 385	6,8	0,383 %	1,2	0,374 %	266	0,318 %
Aquitaine	16 539	27	0,861 %	5	0,946 %	1 227	0,911 %
Auvergne	4 686	8,3	0,637 %	1,5	0,704 %	348	0,641 %
Basse-Normandie	2 408	3,6	0,253 %	0,7	0,273 %	174	0,268 %
Bourgogne	3 540	6,1	0,384 %	1,1	0,407 %	264	0,383 %
Bretagne	5 268	7,9	0,253 %	1,5	0,261 %	380	0,258 %
Centre-Val de Loire	6 200	10,1	0,404 %	1,9	0,417 %	481	0,403 %
Champagne-Ardenne	1 946	4,6	0,356 %	0,8	0,339 %	194	0,315 %
Corse	1 002	1,7	0,633 %	0,3	0,721 %	69	0,670 %
Franche-Comté	4 293	9,4	0,821 %	1,8	0,845 %	440	0,781 %
Haute-Normandie	2 733	5,2	0,289 %	1,1	0,317 %	294	0,320 %
Île-de-France	11 979	44,6	0,379 %	10,2	0,424 %	2 792	0,409 %
Languedoc-Roussillon	5 578	10,3	0,397 %	2,1	0,465 %	530	0,459 %
Limousin	2 520	3,3	0,471 %	0,6	0,556 %	138	0,499 %
Lorraine	7 524	14,3	0,633 %	2,7	0,677 %	674	0,654 %
Midi-Pyrénées	11 618	20	0,722 %	3,6	0,754 %	888	0,716 %
Nord-Pas-de-Calais	13 167	24,1	0,607 %	4,9	0,609 %	1 256	0,585 %
Provence-Alpes-Côte d'Azur	19 365	43	0,878 %	8,1	0,952 %	1 919	0,866 %
Pays de la Loire	10 433	20,4	0,581 %	4	0,585 %	1 054	0,585 %
Picardie	2 258	4	0,212 %	0,8	0,214 %	186	0,189 %
Poitou-Charentes	3 719	5,5	0,319 %	1	0,343 %	216	0,292 %
Rhône-Alpes	21 680	47,1	0,771 %	9,7	0,822 %	2 397	0,758 %

* en pourcentage de la population régionale de la tranche d'âge

Scénario 0,3 μ T**Tableau 38 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,3 μ T)**

Région	Bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%*	N (en milliers)	%*	N	%*
Alsace	3 301	5,1	0,287 %	0,9	0,280 %	196	0,234 %
Aquitaine	12 815	21,2	0,676 %	3,9	0,738 %	973	0,723 %
Auvergne	3 638	6,4	0,491 %	1,2	0,563 %	264	0,487 %
Basse-Normandie	1 763	2,6	0,183 %	0,5	0,195 %	125	0,192 %
Bourgogne	2 721	4,7	0,296 %	0,8	0,296 %	204	0,297 %
Bretagne	3 782	5,9	0,189 %	1,1	0,192 %	282	0,191 %
Centre-Val de Loire	4 688	7,7	0,308 %	1,5	0,329 %	369	0,310 %
Champagne-Ardenne	1 482	3,6	0,278 %	0,6	0,255 %	151	0,244 %
Corse	803	1,4	0,522 %	0,2	0,481 %	54	0,528 %
Franche-Comté	3 386	7,2	0,629 %	1,3	0,610 %	328	0,583 %
Haute-Normandie	2 079	3,9	0,216 %	0,8	0,230 %	213	0,232 %
Île-de-France	9 767	36,6	0,311 %	8,4	0,349 %	2 317	0,340 %
Languedoc-Roussillon	4 417	8,4	0,324 %	1,7	0,376 %	439	0,379 %
Limousin	1 870	2,5	0,357 %	0,4	0,370 %	100	0,361 %
Lorraine	5 886	11,5	0,509 %	2,2	0,552 %	543	0,527 %
Midi-Pyrénées	9 070	15,8	0,570 %	2,9	0,608 %	707	0,570 %
Nord-Pas-de-Calais	10 333	18,7	0,471 %	3,8	0,473 %	962	0,448 %
Provence-Alpes-Côte d'Azur	15 595	34,7	0,709 %	6,6	0,776 %	1 526	0,689 %
Pays de la Loire	8 060	16,5	0,470 %	3,2	0,468 %	863	0,479 %
Picardie	1 734	3,1	0,164 %	0,6	0,160 %	146	0,149 %
Poitou-Charentes	2 791	4,2	0,243 %	0,7	0,240 %	169	0,229 %
Rhône-Alpes	16 758	36,6	0,599 %	7,6	0,644 %	1 857	0,587 %

* en pourcentage de la population régionale de la tranche d'âge

Scénario 0,4 µT**Tableau 39 : estimation du nombre de personnes exposées aux champs basses fréquences liés aux lignes à haute tension selon les régions (scénario 0,4 µT)**

Région	bâtiments	Population totale		Population moins de 15 ans		Population moins de 4 ans	
	N	N (en milliers)	%*	N (en milliers)	%*	N	%*
Alsace	2 479	3,5	0,197 %	0,6	0,187 %	128	0,153 %
Aquitaine	9 964	15,9	0,507 %	2,9	0,549 %	726	0,539 %
Auvergne	2 836	4,7	0,361 %	0,8	0,375 %	186	0,343 %
Basse-Normandie	1 311	1,9	0,133 %	0,4	0,156 %	96	0,148 %
Bourgogne	2 041	3,4	0,214 %	0,6	0,222 %	140	0,204 %
Bretagne	2 762	4,3	0,138 %	0,8	0,139 %	198	0,134 %
Centre-Val de Loire	3 608	5,9	0,236 %	1,1	0,241 %	286	0,240 %
Champagne-Ardenne	1 145	2,7	0,209 %	0,5	0,212 %	110	0,178 %
Corse	648	1,1	0,410 %	0,2	0,481 %	43	0,416 %
Franche-Comté	2 664	5,5	0,481 %	1	0,469 %	247	0,439 %
Haute-Normandie	1 568	2,9	0,161 %	0,6	0,173 %	162	0,176 %
Île-de-France	8 191	29,9	0,254 %	6,9	0,287 %	1 871	0,274 %
Languedoc-Roussillon	3 438	6,7	0,258 %	1,4	0,310 %	361	0,312 %
Limousin	1 369	1,8	0,257 %	0,3	0,278 %	75	0,272 %
Lorraine	4 664	9,2	0,407 %	1,7	0,426 %	434	0,421 %
Midi-Pyrénées	7 087	12,5	0,451 %	2,3	0,482 %	566	0,457 %
Nord-Pas-de-Calais	8 351	15,2	0,383 %	3,1	0,385 %	784	0,365 %
Provence-Alpes-Côte d'Azur	12 687	28,5	0,582 %	5,5	0,646 %	1 259	0,568 %
Pays de la Loire	6 289	12,9	0,368 %	2,5	0,365 %	674	0,374 %
Picardie	1 369	2,4	0,127 %	0,5	0,134 %	113	0,115 %
Poitou-Charentes	2 137	3	0,174 %	0,5	0,171 %	113	0,153 %
Rhône-Alpes	13 065	28,7	0,470 %	6	0,508 %	1 471	0,465 %

* en pourcentage de la population régionale de la tranche d'âge

Notes



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
F94701 Maisons-Alfort cedex
www.anses.fr
[@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)

ISBN 979-10-286-0296-3 - Dépôt légal : juin 2019 -
© Anses Éditions : juin 2019 - Date de publication : juin 2019
Couverture : Parimage (création), Anses (réalisation) - Crédit photo : iStock