



HAL
open science

Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques

Pierre Mormède, Suzanne Bastian, Corine Bayourthe, Alexandre Bounouh,
Philippe Brunshwig, Christophe Chartier, Jean Demarquoy, Thierry
Gidenne, Maryline Kouba, Marie-Christine Meunier-Salaün, et al.

► To cite this version:

Pierre Mormède, Suzanne Bastian, Corine Bayourthe, Alexandre Bounouh, Philippe Brunshwig, et al.. Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques. [0] Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail. 2015, 153 p. hal-01211063

HAL Id: hal-01211063

<https://hal.science/hal-01211063>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootecniques

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Août 2015

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootecniques

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Août 2015

Édition scientifique



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 28 août 2015

AVIS

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

relatif à une « 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 »

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 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 rendus publics.

L'Anses a été saisie le 27 février 2013 pour la réalisation de l'expertise suivante : demande d'approfondissement de l'expertise scientifique relative aux conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences (CEM-EBF) sur la santé animale et les performances zootechniques.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

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 notamment une étude de l'Inserm, Géocap (Bonnet-Belfais *et al.* 2013), étudiant le rôle de l'exposition aux CEM-EBF générés par les lignes à haute tension (HT), dans le développement des leucémies aiguës chez l'enfant.

La France a un réseau de lignes à haute tension (63 à 150 kV) et très haute tension (THT) (> 225 kV) très développé et en constante progression : construction de la ligne THT Cotentin-Maine (400 kV, mise en service le 30 avril 2013), projet de ligne entre la France et l'Espagne, etc. Ces lignes électriques émettent des CEM-EBF (à ne pas confondre avec les champs à très hautes fréquences émis par les antennes relais et les téléphones portables) qui sont suspectés d'avoir des impacts sur la santé (électro-hypersensibilité, certaines maladies neurodégénératives, leucémies aiguës chez l'enfant). De nombreuses recherches sont conduites pour caractériser

l'exposition de la population générale ainsi que celle des travailleurs aux CEM-EBF, mais les recherches se focalisant sur les conséquences des CEM-EBF sur la santé animale sont plus rares. Dans ce contexte, les lignes HT et THT suscitent de vives inquiétudes et de nombreuses personnes (éleveurs, associations de protection de la nature, etc.) s'interrogent sur l'impact de ces champs sur la santé des animaux. Le Groupe permanent de sécurité électrique (GPSE) créé en 1999 par le Ministère de l'agriculture en partenariat avec EDF, a exclu tout effet direct des CEM émis par les lignes HT et THT sur les animaux, hormis les conséquences négatives des courants parasites (voir rapport parlementaire n°2558/506, de mai 2010 (Raoul 2010)). Cependant des associations, des collectifs citoyens, des éleveurs rapportent des troubles du comportement (nervosité, agressivité, etc.) associés à des modifications des performances zootechniques des animaux (productions laitières inégales, diminutions de poids, ralentissement de croissance ...). Dans ce contexte, l'Anses a été saisie pour approfondir l'expertise scientifique relative aux conséquences des CEM-EBF sur la santé animale et les performances zootechniques.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

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) ».

Le traitement de la saisine relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisés « Santé animale » (CES SANT). L'Anses a confié au groupe de travail « Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences » (GT CEM-EBF), rattaché au CES « SANT » l'instruction de cette saisine. Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques) les 18 décembre 2014 et 7 avril 2015. Le rapport d'expertise produit par le GT CEM-EBF tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES. Ces analyses et conclusions sont issues d'un travail d'expertise collégiale au sein d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

Le GT CEM-EBF était constitué de 12 experts issus de différents collectifs d'experts de l'Anses (CES SANT, CES ALAN¹, GT BEA² et CES Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements) qui se sont appuyé pour la rédaction de leur rapport d'expertise sur l'analyse de plus de 300 publications scientifiques, des auditions (Groupement Permanent de Sécurité Electrique dans les élevages agricoles et aquacoles (GPSE), Réseau de Transport d'Electricité (RTE), Chambre d'agriculture de la Manche, vétérinaire géobiologue) et le bilan d'une campagne de mesures des champs électrique et magnétique dans des exploitations agricoles, réalisée dans le cadre d'une Convention Recherche et Développement signée par l'Anses avec le laboratoire Exem.

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.

¹ CES ALAN = Comité d'experts spécialisés « Alimentation animale »

² GT BEA = Groupe de travail « Bien-être des animaux »

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU GT CEM-EBF ET DU CES SANT

3.1 GENERALITES SUR LES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Le rapport du GT présente dans un chapitre d'introduction quelques notions d'électromagnétisme afin de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les champs électromagnétiques (CEM) et la matière, en particulier les interactions possibles des champs électriques (CE) et/ou magnétiques (CM) avec les animaux en élevage. Le corps humain peut être considéré comme un bon conducteur avec des résistances électriques corporelles typiques de l'ordre de 1,5 k Ω . Dans un champ variable, par exemple le champ sinusoïdal à 50 Hz, le corps sera parcouru par un courant à la même fréquence que celle du champ ambiant (électrique ou magnétique). Le CE externe variable ne pénètre que très partiellement le corps (quelques mV/m dans le corps pour un CE externe de quelques kV/m) et on obtient une migration des charges à la surface du corps à l'origine de courants superficiels et un courant résiduel à l'intérieur du corps. Le CM 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 μ T à 50 Hz, les courants induits seront environ 5 000 fois plus faibles que les courants naturels). Les mêmes effets existent chez les différentes espèces de rente et dépendent de leur résistance électrique. Une forte variation existe entre ces espèces, avec une résistance électrique qui décroît des volailles, aux ovins, porcins et bovins. Cette résistance peut également varier en fonction de facteurs individuels (poids, trajet parcouru selon les points d'entrée et de sortie) et environnementaux (fréquence du courant, conductivité des matériaux de contact de type métal, plastique ou béton, conditions ambiantes telles que la présence d'humidité). La particularité de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM par rapport à l'exposition humaine tient à l'environnement particulier des fermes d'élevage où les conditions sont plus propices à la manifestation des effets indirects des CEM. En effet, ces derniers peuvent induire des courants et des tensions parasites sur les différents éléments métalliques des exploitations, à commencer par les bâtiments eux-mêmes, qui se manifestent par des décharges électriques que subissent les animaux au contact des parties métalliques ou par une circulation de courant dans le corps à travers l'application d'une différence de potentiel. Ces effets, qui ne résultent pas de l'exposition directe aux CEM, doivent être également pris en compte dans l'évaluation des effets sanitaires. Dans ce chapitre sont également présentées les sources de champs auxquelles ces animaux peuvent être exposés qu'elles soient naturelles (comme le soleil) ou artificielles (lignes de transport d'électricité, moteurs des équipements présents sans l'élevage, etc.) en insistant sur les effets directs possibles des CEM ainsi que sur les effets indirects (courants et tensions parasites).

3.2 EXPOSITION AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Le second chapitre présente les méthodes permettant d'estimer l'exposition des animaux aux CEM, d'identifier les paramètres pertinents de cette exposition ainsi que les résultats d'une campagne de mesure des CEM en élevage.

3.2.1. Etude de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM-EBF sur 30 exploitations en France

Le manque de données bibliographiques sur l'évaluation de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM-EBF a en effet amené l'Anses à initier une campagne de mesures des CE et CM dans l'environnement de ces animaux sur un échantillon d'une trentaine de fermes, situées à proximité ou non de lignes à THT/HT et représentant différents types de production (vaches laitières, porcs et poules pondeuses). Cette première étude, même si elle n'est pas représentative de toutes les situations des fermes en France, a permis de tirer des premières conclusions sur le niveau moyen des champs rencontrés dans l'environnement typique des élevages en identifiant les sources de ces champs, et en mesurant les niveaux ainsi que leur variation en fonction des activités des animaux au cours de la journée. Les CM mesurés sous les lignes de transport d'électricité HT ou THT restent de faible intensité entre 0,01 et 7,59 μT et les CE varient de 46 à 5 060 kV/m. Ces champs sont de plus faible intensité à l'intérieur des bâtiments d'élevage ($< 3 \mu\text{T}$ et 43 V/m). Les sources internes, représentées par les divers équipements électriques et/ou motorisés typiques des élevages, peuvent générer des champs qui atteignent par exemple 25 μT (armoie électrique), 19 μT (machine à soupe), mais les animaux ne sont pas généralement à proximité de ces sources et ces CM sont comparables à ceux mesurés auprès d'équipements domestiques ou de bricolage courants³.

Suite à cette étude, les experts recommandent la poursuite des études d'évaluation de l'exposition des animaux d'élevage pour tenir compte de la variété des configurations et des environnements rencontrés sur le terrain. Un soin particulier doit être apporté dans le protocole mis en place pour effectuer les mesures et dans le choix des appareils de mesures à utiliser.

De plus, il est important que les mesures de ces champs et de l'exposition des animaux à ces champs soient mieux documentées (métrologie, caractérisation de la source) dans les publications traitant des effets biologiques des CEM. En effet, très peu de publications rendent compte de façon détaillée des moyens de génération et de mesure des CEM alors que la connaissance précise des niveaux de champs appliqués, assortie de son incertitude est extrêmement importante pour exploiter les résultats. Les experts recommandent également de mieux préciser ces éléments dans les futures publications afin de permettre des comparaisons entre études tout en s'assurant de la rigueur scientifique des protocoles de mesure employés et de la conformité de l'instrumentation utilisée, à travers la vérification ou l'étalonnage systématique des appareils de mesure. Il conviendra également de mieux apprécier le niveau réel d'exposition des animaux aux sources de CEM-EBF en raison de l'extrême variabilité des paramètres de cette exposition (intensité, durée).

3.2.2. Champs électromagnétiques et courants parasites

Compte tenu de la configuration, des dimensions particulières et des matériaux des bâtiments d'élevages (importance des structures métalliques), les CEM peuvent être à l'origine de tensions et de courants parasites qui vont circuler dans les éléments métalliques accessibles aux animaux. Ces courants parasites seront d'autant plus importants que les règles en termes de conformité électrique des bâtiments ne sont pas respectées lors de la construction ou modifiées suite à une dégradation dans le temps. Il est donc important de connaître, par la mesure ou la simulation, les niveaux de ces courants et tensions parasites, qui peuvent être générés par la proximité des lignes HT ou THT. Il est également nécessaire de rendre conformes les bâtiments d'élevage aux normes

³ Pour mémoire, 100 μT est la valeur limite d'exposition recommandée pour le public pour des CM de 0Hz à 300 Hz (Conseil de l'Union Européenne 1999).

électriques et de s'assurer d'une mise à la terre efficace des installations et annuler ainsi les effets de ces courants et tensions parasites.

Les connaissances du niveau d'exposition des animaux aux courants parasites sont à ce jour extrêmement limitées. La sensibilité des animaux à ces courants est clairement démontrée en situation expérimentale, mais leur impact sur le niveau de performance et l'état sanitaire des animaux (mammites chez la vache laitière par exemple) dans le contexte multifactoriel des élevages reste mal connu. Comme pour l'étude de l'exposition aux CEM, il est important que les mesures expérimentales de ces courants et de l'exposition des animaux soient bien documentées.

3.3 SYNTHÈSE DE L'EXPERTISE INTERNATIONALE

La troisième partie du rapport présente une synthèse de l'expertise internationale à travers une analyse de la bibliographie disponible. Cette analyse a été conduite selon trois axes principaux : les aspects neurophysiologiques et comportementaux, les performances zootechniques et les impacts sanitaires, une troisième partie a compilé et analysé les données visant à expliciter comment les CEM-EBF pourraient agir sur les fonctions physiologiques des animaux. Cette analyse a été menée autant que possible sur des animaux d'élevage mais aussi sur d'autres espèces animales. Les conclusions et recommandations des experts sont présentées ci-dessous.

3.3.1 Aspect neurophysiologique et comportement

- ✓ Magnétosensibilité, orientation et reconnaissance spatiale : Les animaux montrent une sensibilité au CM, qui se traduit dans le cas du champ magnétique terrestre (CMT) par les phénomènes d'orientation et de navigation, ou de migration, bien connus chez de nombreuses espèces d'oiseaux, de poissons, de mammifères marins ou d'insectes. Chez les animaux de rente, les connaissances sont en revanche plus parcellaires ; l'alignement au CMT est rapporté mais avec des effets transitoires et variables selon les individus. Les données relatives à leur magnéto sensibilité apparaissent progressivement sans pour autant que l'origine biologique de ces manifestations comportementales soit encore établie, faute de recherches fines sur les mécanismes, en particulier concernant l'implication des cryptochromes. Par ailleurs, la modification de cette perception par les CEM-EBF reste encore à préciser.
- ✓ Effets des courants électriques parasites sur le comportement des animaux de rente. Les données bibliographiques relatives à l'impact des courants électriques parasites sur les comportements des animaux se rapportent à des situations où les courants résultent d'un contact direct des animaux avec des structures ou équipements sous tension (matériel d'élevage), particulières représentatives d'installations électriques défectueuses ou de dispositifs dont la mise à la terre était défectueuse, mais également de situations où le courant est induit expérimentalement au niveau des auges ou des abreuvoirs. Dans tous les cas ces courants favorisent des « tensions de pas »⁴ ou des « tensions de contact »⁵, la migration des charges électriques vers le sol se réalisant *via* le corps de l'animal. Ces études concluent à des réponses de stress, modérées à sévères, qui varient selon les espèces compte-tenu de leurs

⁴ Les "tensions de pas" surviennent lorsqu'un courant s'établit entre les membres antérieurs et postérieurs d'un animal.

⁵ Les "tensions de contact" apparaissent au contact d'un élément métallique (abreuvoir, griffe de traite ...). Le courant traverse alors l'animal et retourne au sol par les membres.

différences de résistances corporelles. Des solutions existent en agissant sur l'installation électrique du bâtiment (mise à la terre, équipotentialité des masses métalliques) et en limitant les zones humides au sol.

✓ Effet des champs électromagnétiques sur le comportement des animaux modèles et de rente

Un certain nombre d'essais de terrain ont été conduits sur des bovins, ovins ou équins ainsi que chez des populations d'oiseaux sauvages vivant à proximité de lignes HT/THT.

En l'état actuel des connaissances, il est difficile de tirer des conclusions des résultats de ces essais de terrain compte tenu de la diversité des intensités du CEM et des durées d'exposition, valeurs qui ne sont, dans certains cas, que des estimations en l'absence de données sur le temps réel passé par les animaux à proximité du champ le plus élevé généré par les lignes, et donc du degré d'exposition effectif. Les données sont également parcellaires dans le cas des animaux de rente, en productions porcine et avicole. Les données disponibles sur les animaux de rente sont encore trop limitées pour conclure quant aux effets des CEM sur leur comportement, à des intensités d'exposition inférieures à 100 μ T et en particulier pour des intensités de champ et des durées d'exposition telles que mesurées dans l'étude sur le terrain conduite dans le cadre de cette expertise.

Les travaux relatifs à l'effet des CEM-EBF sur le comportement concernent plus particulièrement les espèces modèles de rongeurs. Elles montrent une diversité des paradigmes expérimentaux utilisés en milieu contrôlé, que ce soit sur l'intensité ou la durée d'exposition aux champs appliqués, sur les dispositifs de tests auxquels sont soumis les animaux ainsi que la nature des réponses observées (apprentissage, mémorisation, préférence, anxiété, etc.). La description des dispositifs d'exposition aux CEM est aussi, selon les études, relativement imprécise ce qui rend difficile de s'assurer d'une exposition efficace et par conséquent de la pertinence des effets rapportés. La variabilité dans les procédures expérimentales explique en partie la difficulté à conclure quant à des effets des CEM, en particulier dans le cas de CEM-EBF. Les données de la littérature sur les rongeurs incitent à rester prudents ; les effets ne sont observés qu'à des niveaux d'exposition très largement supérieurs à 100 μ T.

3.2.2 Effets sur les performances zootechniques et impact sanitaire

- ✓ Chez les bovins laitiers la plupart des études en milieu expérimental contrôlé, montre que les courants parasites (dans la gamme des niveaux d'intensité testés) n'ont pas d'impact sur les performances laitières des animaux. En ce qui concerne les effets des CEM, les résultats des quelques études conduites en milieu contrôlé rapportent des effets potentiels sur les performances des animaux (augmentation de l'ingéré et impact variable sur la production laitière), chez des vaches en production exposées sur une durée n'excédant pas 30 jours à des CE et/ou CM de 10 kV/m et/ou 30 μ T. Dans toutes ces études, les conditions sont extrêmement bien contrôlées et donc loin de refléter celles rencontrées en élevage, ce qui explique sans doute les effets différents observés sur les performances zootechniques entre des essais expérimentaux et les observations faites en élevage.

L'immense majorité des résultats des essais de terrain, conduits à proximité de lignes HT/THT ne montre pas d'effet détectable des CEM sur les performances et la santé des bovins, à l'exception d'une enquête sur la fertilité dans deux troupeaux Suédois. Ces résultats sont toutefois à considérer avec les réserves suivantes : l'intensité du CEM et la durée d'exposition

des animaux sont variables d'un essai à l'autre ; les CE et CM n'ont pas été précisément mesurés et les valeurs moyennes données sont seulement des estimations ; dans certains essais, les animaux pourraient n'avoir jamais été exposés pendant certaines parties de la journée, voire pendant plusieurs jours consécutifs parce que le courant circulant dans les lignes HT/THT varie, tout comme la distance entre les animaux et la ligne (les animaux dans des enclos se déplacent et ne sont pas en permanence à la valeur de champ la plus élevée). Ces variations de courant dans les lignes ainsi que les déplacements des animaux peuvent affecter l'intensité du CEM auquel les animaux sont exposés et en conséquence leurs réponses comportementale, zootechnique et physiologique.

- ✓ Dans le cas des volailles, il apparait un effet tératogène des CEM mais avec un effet fenêtre⁶, c'est-à-dire s'exprimant aux niveaux intermédiaires d'intensité. Quelques études montrent cependant des effets favorables des CEM, par exemple, ils réduisent les lésions intestinales des poulets atteints de coccidiose. L'hypothèse est que l'exposition à un CEM stimule le système immunitaire. Des effets favorables des CEM s'observent également sur les performances de reproduction de certains oiseaux (la poule reproductrice, le faucon crécerelle, le balbuzard) ; par contre des effets défavorables d'une exposition à un CEM sont observés sur les performances de reproduction chez l'hirondelle.
- ✓ Dans le cas des porcs, les données restent très parcellaires. De rares effets ont été rapportés sur la reproduction (ex. dégradation de la fonction spermatique, taux de fertilisation réduit, etc.) et à des niveaux d'exposition (1 mT) largement au-dessus de ceux auxquels on peut s'attendre en élevage.

Dans tous les cas, les données de la littérature disponibles sur les animaux de rente ne permettent pas de conclure sur un effet majeur et spécifique des CEM sur les performances et la santé des animaux, en particulier dans des intensités d'exposition inférieure à 100 μ T, considérant de plus que les valeurs relevées dans la campagne de mesure sont nettement plus faibles que ce seuil (< 3 μ T).

3.2.3 Les hypothèses mécanistiques

✓ Effets des CEM-EBF sur les rythmes biologiques circadiens

Un ensemble de données expérimentales incite à proposer une hypothèse pouvant expliquer le mécanisme de l'action éventuelle des CEM-EBF sur les fonctions physiologiques des animaux. L'intensité globale de l'exposition résulte à la fois du CMT et de CEM-EBF fluctuants, ce qui a été considéré comme pouvant affecter la régulation des rythmes biologiques, même sous l'action de champs d'intensité de quelques dizaines de μ T.

A cet égard, les cryptochromes des cellules rétinienne sont actuellement le plus étudiés et il a été montré que ces flavoprotéines sensibles à la lumière bleue déclenchent une réaction de photoréduction présentant une sensibilité à des CM de quelques μ T. Dans l'hypothèse de l'existence d'un sens directionnel qui serait basé sur les propriétés des cryptochromes rétinien (l'existence de ce sens est postulée sur la base d'observations comportementales chez certains

⁶ Un effet fenêtre correspond à une réponse non linéaire, c'est à dire un effet négatif moins important pour les intensités de champ les plus fortes ou les plus faibles.

rongeurs et chez des oiseaux), des oscillations du CMT pourraient interférer avec le fonctionnement normal de ce sens. La question non encore élucidée reste de savoir si une telle interférence pourrait affecter les fonctions chronobiologiques des cryptochromes et intervenir dans l'association constatée entre exposition prolongée aux CEM-EBF et la leucémie chez le jeune enfant par exemple. En l'absence d'explication alternative étayée sur des données expérimentales contrôlées, cette interrogation subsiste.

Au-delà d'une corrélation statistique reconnue entre leucémie aiguë et exposition aux CEM-EBF chez de jeunes individus, nous ne disposons que d'hypothèses pour comprendre la chaîne des mécanismes en jeu. La question scientifique fondamentale qui subsiste porte donc sur l'identification du substrat biologique de l'effet des CEM.

Une autre étape de travail quant à l'identification de ce substrat a favorisé l'hypothèse de la mélatonine, suite à l'observation d'un effet inhibiteur partiel des CEM-EBF sur la sécrétion de mélatonine (l'amplitude du pic nocturne est diminuée, et la phase souvent décalée sur le cycle de 24 h). Il existe donc potentiellement une perturbation des biorythmes qui pourrait se traduire par des modifications comportementales ou des irrégularités des cycles de reproduction. Les effets perturbateurs des biorythmes sont plus solidement étayés dans le cas d'expositions prolongées (≥ 4 semaines), et ceci de manière plus évidente sur de jeunes animaux.

Aujourd'hui, la communauté scientifique continue à favoriser l'hypothèse d'une action sur les rythmes biologiques, mais la mélatonine n'est plus l'élément d'interface initial ou princeps. L'évolution des connaissances tend à privilégier le rôle des cryptochromes, éléments reconnus comme moteurs de la machinerie moléculaire des rythmes au sein de la cellule, y compris des rythmes de multiplication cellulaire. Il reste intéressant de noter que dans ces deux hypothèses (cryptochromes et mélatonine), un élément commun subsiste, celui d'une perturbation des rythmes biologiques sur une période proche de 24 h.

✓ Effets des CEM sur les canaux ioniques cellulaires

Les données concernant les effets des CEM sur les canaux ioniques cellulaires, c'est-à-dire sur l'excitabilité des cellules, en particulier des cellules nerveuses et neuro-sécrétrices, proviennent de conditions expérimentales variées et fort différentes des situations rencontrées en élevage. Ceci est valable indépendamment du type cellulaire ou de la catégorie de canal ionique étudié. Le plus souvent ce sont des expositions précoces (tissus prélevés sur des fœtus ou des nouveau-nés) qui tendent à avoir des effets plus marqués vis-à-vis du développement ultérieur des propriétés cellulaires. Cette constatation n'est pas sans rappeler la prévalence des effets d'expositions chez le jeune enfant humain, sans pour autant disposer de preuves validées expérimentalement sur des tissus d'origine humaine.

✓ Effets des CEM sur l'ADN

Concernant les effets des CEM sur l'ADN, toutes les études de type revue ou méta-analyse insistent sur le manque d'expériences qui pourraient faire référence dans ce domaine (néanmoins dans 22 % de ces études, un effet génotoxique des CEM-EBF est observé). Même si tout laisse à penser que les données obtenues sur les effets génotoxiques des CEM peuvent être transposées d'une espèce de mammifère à une autre, aucune donnée ne concerne les animaux d'élevage.

L'exposition à des CEM-EBF peut entraîner certaines altérations de l'ADN, de plus, ils semblent capables d'amplifier les effets génotoxiques d'autres composés, notamment chimiques.

✓ Effet sur le stress oxydant

Même si le débat n'est pas clos, plusieurs études ont suggéré que l'effet des CEM sur la structure de l'ADN pouvait être lié à une altération des capacités de lutte de l'organisme vis-à-vis des radicaux libres. Des études *in vivo*, chez l'animal entier ou *in vitro* sur des cultures de cellules ont en effet montré une diminution de la tolérance des animaux et des cellules au stress oxydant après contact avec un CEM. Dans la mesure où le stress oxydant est bien connu pour induire des altérations dans la structure du génome, les champs pourraient, par cet intermédiaire qu'est le stress oxydant, induire des mutations de l'ADN. La signification fonctionnelle de ces effets montrés à des niveaux d'exposition très élevés reste à être démontrée en conditions réelles d'exposition, en particulier chez les animaux domestiques pour lesquels aucune donnée n'est disponible.

✓ Effets sur l'immunité

Les effets rapportés des CEM-EBF sur l'immunité sont le plus souvent une diminution du nombre de lymphocytes, une diminution de la prolifération des cellules T ou NK ou une incidence sur la sécrétion de cytokines. Mais d'autres études ne parviennent pas à mettre en évidence un effet des CEM-EBF. L'interprétation de ces études est difficile dans la mesure où elles présentent de grandes variations dans l'exposition et l'environnement d'expérimentation. De plus, le problème majeur de ces études est la faible taille des échantillons (nombre de sujets) pour permettre de conclure quant à l'influence des CEM-EBF sur les systèmes immunitaire et hématologique et les données disponibles sont peu homogènes et ne conduisent pas à un faisceau de preuves suffisantes, pour conclure sur la présence certaine d'un effet des CEM sur le système immunitaire.

✓ CEM-EBF et stress physiologique

Les modifications comportementales le plus souvent attribuées à un état de stress prolongé sont de type « anxiété » ou « dépression ». Au plan biologique, les réponses de stress s'apprécient par les variations observées au niveau des deux principaux systèmes neuroendocriniens mis en jeu, l'axe corticotrope et le système nerveux autonome, ainsi que par les modifications physiologiques qu'ils induisent, en particulier métaboliques, cardiovasculaires et immunitaires.

Chez les animaux domestiques, trois études (lapins, agneaux et vaches) bien menées, avec des niveaux d'exposition faible à moyen, n'ont pas montré d'effet des CEM-EBF. Chez la souris, une étude, a également obtenu des résultats négatifs dans un CE atteignant jusque 50 kV/m et une exposition chronique pendant 42 jours.

A des niveaux élevés de CM (200 μ T à 1,5 mT), divers effets ont pu être décrits chez le rat et la souris, en particulier une augmentation de la concentration en corticostérone plasmatique, qui pourrait résulter d'une stimulation directe du cortex surrénalien. Cette hypothèse reste à confirmer.

3.4 CONCLUSIONS

3.4.1 Sur les protocoles d'étude

Une très grande diversité d'expérimentations et de résultats, est observée avec un manque de standardisation de protocoles de référence et de méta-analyses. De ce fait, les conclusions sont très difficiles à tirer.

Les études sur les animaux d'élevage restent peu nombreuses.

- ✓ Les études épidémiologiques à grande échelle, qui permettraient de mettre en évidence les effets éventuels des CEM-EBF d'origine externe (lignes HT par exemple) et internes (équipements électriques) sur les caractères de production, de santé et de bien-être des animaux d'élevage, sont inexistantes. Il en est de même pour les courants parasites en général et ceux éventuellement générés par les CEM-EBF en particulier.
- ✓ Les résultats des études de cas menées dans les exploitations à problèmes, à proximité des lignes HT, sont difficiles à interpréter en raison de l'absence de situation de référence.
- ✓ Quelques études expérimentales ont été menées, en particulier en Amérique du Nord, à des niveaux d'exposition aux CEM que l'on peut rencontrer en élevage. Les quelques effets obtenus sont de faible importance et n'ont pas été trouvés dans toutes les études.

Les expérimentations sur des espèces modèles (souris, etc.) se caractérisent aussi par une extrême diversité:

- ✓ des types de modèle étudiés : modèles *in vitro* sur cultures de cellules explantées ou lignées établies, modèles *in ovo* (poule) sur le développement embryonnaire, modèle *in vivo* essentiellement chez les rongeurs de laboratoire à différents stades de développement ;
- ✓ des hypothèses et plans expérimentaux ainsi que des mesures effectuées ;
- ✓ des caractéristiques des champs appliqués, champ électrique ou magnétique seul, ou champ électromagnétique, le plus souvent à 50 ou 60 Hz dans une très large gamme d'intensité, mais souvent très élevée en particulier pour le champ magnétique alternatif (> 100 μ T) ou pulsé à fréquences diverses ;
- ✓ de la durée d'exposition et du nombre d'occurrences.

La pertinence des conditions expérimentales est rarement argumentée, en particulier par rapport aux niveaux d'exposition mesurés sur le terrain, et peu d'études montrent des relations dose (intensité, temps, ...) – effet. On peut cependant signaler, dans les études sur le développement embryonnaire du poussin, la description d'un « effet fenêtre », pour lequel les CEM influencent le processus étudié dans une fourchette bien précise de fréquence et d'intensité. Il serait important de mieux systématiser les études (conditions expérimentales, paramètres, etc.) et d'argumenter les choix techniques. On peut rappeler ici l'importance de la qualité de la mesure des champs appliqués pendant toute l'expérience.

Quelques pistes de recherche peuvent être mentionnées ici : distinction des effets des champs électrique, magnétique et de leur combinaison, rôle des courants parasites, étude des relations dose-effet avec recherche de seuils faibles et d'un éventuel « effet-fenêtre », observations dans la durée pour analyser la cinétique des effets et rechercher des effets sur le long terme, étude des effets sur le jeune animal et pendant son développement pour rechercher des sensibilités particulières (cf. leucémie chez l'enfant).

3.4.2 Sur la mesure des effets

Les conséquences physiologiques des CEM-EBF n'ont pas été 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.

Une difficulté majeure pour comprendre les effets des CEM est l'absence d'hypothèse sur les mécanismes d'action des CEM-EBF sur les organismes.

✓ Le comportement et les effets neurobiologiques

Peu d'information est disponible sur la perception du CM par les animaux et son utilisation (orientation des déplacements par exemple), et on ignore si les CEM influencent la perception et l'utilisation du champ magnétique terrestre.

Il n'y a pas d'effet manifeste des CEM-EBF sur le comportement des animaux d'élevage bien que les données soient limitées. Il n'a pas été mis en évidence de réponse non spécifique de stress.

Chez les rongeurs, il a été observé dans certaines études une dégradation des fonctions cognitives (apprentissage et mémorisation) à des niveaux d'exposition supérieurs à 100 μ T.

✓ Les performances zootechniques et sanitaires

Chez les bovins, les publications ne montrent pas d'effets majeurs ou univoques sur la fertilité, la production laitière et la santé dans les exploitations exposées en conditions non contrôlées ou semi-contrôlées. Il est rapporté lors des essais en conditions contrôlées (CEM de 30 μ T, 30 jours) une baisse possible de la production laitière, du taux butyreux et une augmentation de l'ingestion.

Chez les volailles, une plus forte mortalité et une inhibition du développement embryonnaire (avec « effet fenêtre » pour les doses efficaces), ont été rapportées tandis que l'effet tératogène est controversé. Quelques effets favorables ont été décrits : résistance à la coccidiose, reproduction.

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 CEM.

✓ Les hypothèses mécanistiques des effets des champs électromagnétiques

Compte tenu des quelques effets rapportés certaines hypothèses ont été avancées pour les expliquer. Au plan physiologique plusieurs études ont montré un changement du rythme circadien induit par les CEM-EBF avec dans certains modèles une altération des profils de sécrétion de la mélatonine. A ce sujet une interaction des CEM-EBF avec le fonctionnement des cryptochromes n'est pas à exclure.

Toutes espèces confondues, les CEM-EBF semblent avoir un effet génotoxique et surtout leur présence semble être capable d'amplifier les effets génotoxiques d'autres composés, notamment chimiques. Par ailleurs, les CEM-EBF semblent augmenter les effets d'un stress oxydant, ce qui pourrait expliquer l'effet de ces ondes sur l'ADN.

Par contre, toutes les tentatives visant à relier les CEM-EBF à des dysfonctionnements du système immunitaire et au stress physiologique sont restées infructueuses.

De nombreux travaux sont toujours en cours sur ces mécanismes hypothétiques et il est nécessaire de continuer la veille scientifique dans ces domaines en veillant à la qualité des protocoles expérimentaux mis en œuvre.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du GT CEM-EBF et du CES SANT relatives aux conséquences des CEM-EBF sur la santé animale et les performances zootechniques.

Le rapport des experts souligne que bien que de rares effets aient été observés chez les animaux : dégradation des fonctions cognitives chez l'animal de laboratoire (pour une exposition > 100 μ T), baisse possible de la production laitière, du taux butyreux et augmentation de l'ingestion chez la vache laitière (CEM de 30 μ T, 30 jours), etc. ; il reste difficile de se prononcer quant aux effets sanitaires directs des CEM-EBF sur les animaux d'élevage ceci d'autant plus que les mécanismes d'action des CEM-EBF ne sont pas encore identifiés. Les effets des courants parasites sont eux

bien connus mais leur impact sur le niveau de performance et l'état sanitaire des animaux (mammites chez la vache laitière par exemple) dans le contexte multifactoriel des élevages reste mal connu.

Dans ce contexte, l'Anses souligne l'importance de la standardisation des protocoles expérimentaux, ainsi que la qualité de la mesure des champs appliqués et une bonne caractérisation de l'exposition des animaux.

Marc Mortureux

MOTS-CLES

Champ électromagnétique, extrêmement basses fréquences, ligne haute tension, courant parasite, élevage, performance zootechnique, comportement, santé.

BIBLIOGRAPHIE

Bonnet-Belfais M, Lambrozo J, Aurengo A (2013) Comment: Childhood leukaemia and power lines - The Geocap study: Is proximity an appropriate MF exposure surrogate? British Journal of Cancer 109(5), 1382-1383.

Raoul D (2010) Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

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

Saisine «2013-SA-0037 - CEM-EBF»

**Saisines liées : « 2013-SA-0038 » portant le titre « Mise à jour de l'ensemble de
l'expertise scientifique sur les champs électromagnétiques extrêmement basses
fréquences concernant aussi bien la population générale que les travailleurs »
et « 2008/006 » portant le titre « Synthèse de l'expertise internationale sur les effets
sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences »**

RAPPORT d'expertise collective

**« Comité d'experts spécialisé en santé animale »
« GT Champs Electromagnétiques Extrêmement Basses Fréquences »**

Mai 2015

Mots clés

Champ électromagnétique, extrêmement basses fréquences, ligne haute tension, courant parasite, élevage, performance zootechnique, comportement, santé.

Présentation des intervenants

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

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Pierre MORMEDE – INRA Toulouse – Compétences en génétique du stress, endocrinologie, bien-être animal

Membres

Mme Suzanne BASTIAN – ONIRIS Nantes – Compétences en épidémiologie, bactériologie, parasitologie

Mme Corine BAYOURTHE – ENSA - Toulouse – Compétences en zootechnie, ruminants

M. Alexandre BOUNOUH – LNE – Compétences en physique, champs électromagnétiques

M. Philippe BRUNSCHWIG – Institut de l'élevage – Compétences en zootechnie, ruminants

M. Christophe CHARTIER – ONIRIS Nantes – Compétences en parasitologie, pathologie des ruminants, épidémiologie

M. Jean DEMARQUOY – Université de Bourgogne – Compétences en physiologie

M. Thierry GIDENNE – INRA Toulouse – Compétences en zootechnie, physiologie digestive, nutrition, cuniculture

Mme Maryline KOUBA – AGROCAMPUS OUEST – Compétences en zootechnie, porcs et volailles

Mme Marie-Christine MEUNIER-SALAÜN – INRA Rennes – Compétences en éthologie, physiologie du stress, physiologie du comportement, zootechnie, bien-être du porc

M. Yves MILLEMANN – ENV Alfort – Compétences en pathologie des animaux de rente, épidémiologie, bactériologie

M. Jacques SERVIERE – INRA AgroParistech – Compétences en Neurobiologie, neurophysiologie, physiologie du stress, physiologie du comportement, éthologie, bien-être des volailles

COMITE D'EXPERTS SPECIALISE

Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES SANT du 7 avril 2015

Président

M. Etienne THIRY – Faculté de médecine vétérinaire de Liège (Belgique) (virologie, immunologie)

Membres

Mme Suzanne BASTIAN – ONIRIS Nantes – Compétences en épidémiologie, bactériologie, parasitologie

M. Christophe CHARTIER – ONIRIS Nantes – Compétences en parasitologie, pathologie des petits ruminants

Mme Véronique CHEVALIER – CIRAD-EMVT – Compétences en épidémiologie, pathologie aviaire exotique

M. Eric COLLIN – Vétérinaire praticien – Compétences en pathologie des ruminants

M. Philippe DORCHIES – ENV Toulouse – Compétences en parasitologie, zoonoses

Mme Barbara DUFOUR – ENV Alfort – Compétences en épidémiologie, maladies infectieuses, pathologie des ruminants

M. Gilles FOUCRAS – ENV Toulouse – Compétences en immunologie, génétique, pathologie des ruminants

M. Jean-Pierre GANIERE – ONIRIS Nantes – Compétences en maladies contagieuses, réglementation, zoonoses

M. Bruno GARIN-BASTUJI – Directeur de Recherche, Direction des affaires européennes et internationales, Anses – Compétences en bactériologie, brucellose, tuberculose

M. Jean GUILLOTIN – Laboratoire départemental du Nord – Compétences en diagnostic de laboratoire, infectiologie

Mme Nadia HADDAD – Anses UMR BIPAR, ENV Alfort – Compétences en microbiologie, épidémiologie, maladies contagieuses

M. Jean HARS – Office national de la chasse et de la faune sauvage – Compétences en pathologie de la faune sauvage libre, épidémiologie

Mme Claire LAUGIER – Anses Dozulé – Compétences en pathologie équine, diagnostic de laboratoire

Mme Arlette LAVAL – ONIRIS Nantes – Compétences en pathologie porcine

M. Yves LEFORBAN – Inspecteur Général de santé publique honoraire – Compétences en virologie, réglementation

Mme Coralie LUPO – IFREMER – Compétences en épidémiologie, pathologies aviaire et aquacole

M. Gilles MEYER – ENV Toulouse – Compétences en pathologie des ruminants, virologie

Mme Virginie MICHEL – Anses Laboratoire de Ploufragan/Plouzané – Compétences en pathologie aviaire, bien-être animal

M. Yves MILLEMANN – ENV Alfort – Compétences en pathologie des animaux de rente, épidémiologie, bactériologie

Mme Sophie MOLIA – CIRAD – Compétences en épidémiologie, pathologie tropicale

M. Pierre MORMEDE – INRA Toulouse – Compétences en génétique du stress, endocrinologie, bien-être animal

M. Philippe NICOLLET – Laboratoire d'analyses de Vendée – Compétences en diagnostic de laboratoire

M. Jean-Louis PELLERIN – ONIRIS Nantes – Compétences en microbiologie, prophylaxie médicale

Mme Nathalie RUVOEN – ONIRIS Nantes – Compétences en maladies contagieuses, zoonoses, réglementation

M. Claude SAEGERMAN – Faculté de médecine vétérinaire de Liège – Compétences en épidémiologie, maladies contagieuses, maladies émergentes

M. Bernard TOMA – ENV Alfort – Compétences en épidémiologie, maladies contagieuses

Mme Jaqueline VIALARD – Anses Niort – Compétences en pathologie infectieuse, pathologie des ruminants

M. Stéphan ZIENTARA – Anses Laboratoire de santé animale de Maisons-Alfort – Compétences en virologie

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Charlotte DUNOYER – Chef d'unité – Anses

Mme Florence ÉTORÉ – Adjointe – Anses

Secrétariat administratif

Mme Françoise LOURENÇO – Anses

M. Régis MOLINET - Anses

AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES

Groupe Permanent de Sécurité Electrique dans les élevages agricoles et aquacoles (GPSE)

M. François Gallouin (Président, AgroParisTech), Mme Arlette Laval (ONIRIS) et M. Henri Brugère (ENVA) le 15 octobre 2013

Reseau de Transport d'Electricité (RTE)

MM. François Deschamps et Jacques Frémaux (Département Concertation-Environnement) le 13 novembre 2013

M. Bernard Puisset, vétérinaire géobiologue, le 13 novembre 2013

M. Pascal Férey, Président de la FDSEA, Vice-Président de la FNSEA et Président de la Chambre d'Agriculture de la Manche, le 24 avril 2014

CONTRIBUTIONS EXTERIEURES AU COLLECTIF

Données issues de la campagne de mesures réalisée dans le cadre d'une Convention recherche et développement, signée avec le laboratoire Exem.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	9
Liste des tableaux.....	11
Liste des figures	12
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	13
1.1 Contexte.....	13
1.2 Objet de la saisine.....	13
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	14
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	14
2 Généralités sur les champs électromagnétiques	15
2.1 Notions de champs	15
2.1.1 Champ électromagnétique.....	15
2.1.2 Champ électrique	16
2.1.3 Champ magnétique.....	16
2.2 Grandeurs physiques	18
2.3 Spectre électromagnétique	18
2.4 Interactions liées aux champs électromagnétiques	21
2.4.1 Interactions liées au champ électrique	21
2.4.2 Interactions liées au champ magnétique	21
2.4.3 Effets sur le corps humain et les animaux d'élevage	21
2.5 Sources de champs électromagnétiques en élevage	25
2.5.1 Sources naturelles	25
2.5.2 Sources artificielles – identification des sources en élevage.....	26
2.6 Champs électromagnétiques et courants parasites	27
3 Exposition aux champs électromagnétiques	29
3.1 Notion d'exposition.....	29
3.2 Méthodes d'évaluation de l'exposition.....	29
3.3 Etude de l'exposition des animaux d'élevage aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, sur 30 exploitations en France	31
3.3.1 Présentation de l'étude	31
3.3.2 Principaux résultats.....	32
3.3.2.1 Cartographie.....	33
3.3.2.2 Mesures à proximité des appareils.....	37
3.3.2.3 Mesures en continu sur les bovins	40
4 Effets biologiques des champs électromagnétiques sur le comportement, la santé animale et les performances zootechniques – synthèse de l'expertise internationale.....	45
4.1 Aspects neurophysiologiques et comportement.....	45
4.1.1 Magnétosensibilité, orientation et reconnaissance spatiale	45

4.1.2	Effets des courants électriques parasites sur le comportement des animaux de rente	47
4.1.2.1	Chez les bovins	48
4.1.2.2	Chez les porcs.....	49
4.1.2.3	Chez l'Abeille domestique (<i>Apis mellifera</i>)	50
4.1.2.4	Conclusion.....	51
4.1.3	Effet des champs électromagnétiques sur le comportement des animaux modèles et de rente	52
4.1.3.1	Essais de terrain ou en milieu semi-contrôlé.....	52
4.1.3.2	Etudes expérimentales en milieu contrôlé.....	53
4.1.3.3	Conclusion.....	57
4.1.4	Conclusion sur l'aspect neurophysiologique et comportement	58
4.2	Performances zootechniques et impact sanitaire.....	59
4.2.1	Effets des champs électromagnétiques chez les bovins laitiers.....	59
4.2.1.1	Effets des courants parasites	59
4.2.1.2	Effets des champs électromagnétiques.....	61
4.2.1.2.1	<i>Suivis sanitaires en exploitations et études épidémiologiques, en conditions non contrôlées.....</i>	<i>61</i>
4.2.1.2.2	<i>Essais terrain, en conditions semi-contrôlées</i>	<i>62</i>
4.2.1.2.3	<i>Etudes expérimentales en conditions contrôlées</i>	<i>63</i>
4.2.2	Effet des champs électromagnétiques sur les monogastriques	65
4.2.2.1	Effets chez les volailles	65
4.2.2.1.1	<i>Effet des champs électromagnétiques sur le développement embryonnaire</i>	<i>65</i>
4.2.2.1.2	<i>Effet des champs électromagnétiques sur les performances de reproduction des oiseaux</i>	<i>67</i>
4.2.2.1.3	<i>Effet positif des champs électromagnétiques sur la coccidiose.....</i>	<i>67</i>
4.2.2.1.4	<i>Conclusion.....</i>	<i>68</i>
4.2.2.2	Effet des champs électromagnétiques chez les porcins.....	68
4.2.2.2.1	<i>Effets des courants parasites</i>	<i>68</i>
4.2.2.2.2	<i>Effets des champs électromagnétiques sur les performances de croissance et de reproduction</i>	<i>69</i>
4.2.2.2.3	<i>Conclusion.....</i>	<i>69</i>
4.2.3	Conclusion sur les réponses zootechniques et l'impact sanitaire	70
4.3	Mécanismes physiologiques.....	71
4.3.1	Effets des champs électromagnétiques sur les rythmes biologiques circadiens.....	71
4.3.1.1	L'hypothèse de la mélatonine.....	71
4.3.1.2	Effets des champs électromagnétiques sur les cryptochromes.....	73
4.3.1.3	Conclusions sur l'effet des champs électromagnétiques sur les rythmes biologiques circadiens.....	75
4.3.2	Effets des champs électromagnétiques sur les canaux ioniques cellulaires, en particulier canaux ioniques des cellules excitables.....	76
4.3.3	Effets des champs électromagnétiques sur l'ADN	77
4.3.3.1	Les méta-analyses	77
4.3.3.2	Effets sur des cellules en culture.....	78
4.3.3.3	Etudes sur animaux.....	78
4.3.3.4	Conclusions sur les effets des champs électromagnétiques sur L'ADN.....	79
4.3.4	Champs électromagnétiques et stress oxydant.....	79
4.3.5	Champs électromagnétiques et immunité	81
4.3.5.1	Etudes <i>in vitro</i>	81
4.3.5.2	Etudes <i>in vivo</i>	82
4.3.5.3	Conclusions sur les effets des champs électromagnétiques sur l'immunité	83
4.3.6	Champs électromagnétiques et stress physiologique	84
4.3.6.1	Chez les mammifères domestiques	84
4.3.6.2	Chez l'humain.....	85
4.3.6.3	Chez les rongeurs de laboratoire	85
4.3.6.4	Conclusion sur les champs électromagnétiques et le stress physiologique	86
4.3.7	Conclusion sur les mécanismes physiologiques	87
5	Conclusions du groupe de travail	88
5.1	Périmètre de la saisine	88
5.2	Les protocoles d'étude	89

5.3 La mesure des effets.....	90
5.3.1 Le comportement et les effets neurobiologiques	90
5.3.2 Les performances zootechniques et sanitaires	90
5.4 Les hypothèses mécanistiques des effets des champs électromagnétiques	91
6 Bibliographie.....	92
ANNEXES	108
Annexe 1 : Lettre de saisine.....	109
Annexe 2 : Précautions et exigences pour les mesures de champs électriques de basse fréquence.....	110
Annexe 3 : Résultats détaillés de la CRD	113
Annexe 4 : Tableaux de calcul des incertitudes dans les mesures de CM et CE	125
Annexe 5 : Tableaux de synthèse	127

Sigles et abréviations

ACTH : *adrenocorticotropic hormone* - corticotropine

ADN : acide désoxyribonucléique

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

ARN : acide ribonucléique

AVP: *arginine-vasopressine* - vasopressine

BBEMG : *Belgian BioElectroMagnetics Group*

CE : champ électrique

CEM : champs électromagnétiques

CEM-EBF : champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

CM : champ magnétique

CMT : champ magnétique terrestre

Cellules NK : *Natural Killer* - cellules tueuses (lymphocytes non B et non T)

CD4/CD8 : cluster de différenciation 4 ou 8. Glycoprotéines exprimées à la surface de certains lymphocytes T, servant de marqueur de différenciation pour les lymphocytes auxiliaires (CD4+) et cytotoxiques (CD8+)

CRH : *corticotropin-releasing hormone* – corticolibérine

dB : décibel, unité de grandeur sans dimension, définie comme dix fois le logarithme décimal du rapport entre deux puissances.

EDF : Électricité de France

ERDF : Électricité réseau distribution France

F : farad, unité dérivée de capacité électrique du système international d'unité.

FAD : flavine adénine dinucléotide

GABA : acide γ -aminobutyrique

GH : *growth hormone* – somatotropine (hormone de croissance)

GMQ : gain moyen quotidien

GPSE : Groupement permanent de sécurité électrique

HIO MM : hydroxyindole O-méthyltransferase

HT : haute tension

IL : interleukine

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

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

IRM : imagerie par résonance magnétique

MSI : matière sèche ingérée

NA : noradrenaline

NAT : N-acetyltransferase

PL : Production laitière

POMC : pro-opiomélanocortine

RTE : Réseau de transport d'électricité

ROS : espèces réactives oxygénées - *Reactive Oxygen Species*

RONs : espèces réactives oxygénées et azotées (RONs, N pour *Nitrogen*)

T : tesla, unité dérivée d'induction électromagnétique (ou champ magnétique) du Système international d'unités.

T3 : tri-iodothyronine

T4 : thyroxine

TB : taux butyreux

TG : thyroglobuline

TP : taux protéique

THT : très haute tension

TNF : facteur de nécrose tumorale - *Tumor Necrosis Factor*

Vc : tension de contact

Vp : tension de pas

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quelques grandeurs physiques et leurs unités	18
Tableau 2 : Valeurs moyennes de la résistance électrique, mesurée chez la vache laitière en fonction du trajet parcouru par le courant électrique.	24
Tableau 3 : Valeurs des champs électrique et magnétique 50 Hz mesurés dans les exploitations près des lignes de transport d'électricité.	34
Tableau 4 : Valeurs des transits (A) relevés dans les lignes au moment des mesures, CM et CE mesurés sous les lignes à différents moment de la journée.....	36
Tableau 5 : Champ magnétique émis par différents équipements présents dans les fermes d'élevage. Les champs maximums sont mesurés à une distance de 30 cm.....	37
Tableau 6 : Champ magnétique émis par différents équipements domestiques à une distance de 30 cm....	39
Tableau 7 : Résultats des mesures en continu sur bovins équipés d'un enregistreur, sur une durée de 24 h pour les exploitations proches des lignes HT/THT et de 8 h pour les exploitations à l'écart de lignes HT/THT.	43
Tableau 8 : Seuils de perception du courant électrique mesurés chez la vache laitière en fonction de l'intensité (en mA) et du trajet parcouru par le courant électrique.	49
Tableau 9: Bilan d'incertitudes sur les mesures de CM sous les lignes	125
Tableau 10: Bilan d'incertitudes sur les mesures de CE sous les lignes	126
Tableau 11 : Bilan d'incertitudes sur les mesures de CM à proximité des machines agricoles.....	126
Tableau 12 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur le comportement des animaux de rente	127
Tableau 13 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur le comportement d'animaux de rente, en conditions terrain ou semi-contrôlées	130
Tableau 14: Effets des champs électromagnétiques sur le comportement en conditions contrôlées	131
Tableau 15 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur la production laitière (PL) et certains autres paramètres zootechniques mesurés chez la vache laitière.	136
Tableau 16 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions semi-contrôlées.	139
Tableau 17 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions contrôlées.	140
Tableau 18 : Effets majeurs de l'exposition à un champ électromagnétique (CEM) sur le développement embryonnaire de l'oiseau.....	141
Tableau 19: Effets majeurs de l'exposition à un champ électromagnétique (CEM) sur la reproduction des oiseaux.....	143
Tableau 20 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites ou un CEM-EBF sur les performances et autres paramètres zootechniques ou de santé mesurés chez le porc.....	144
Tableau 21 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur les rythmes et le taux de mélatonine.....	145
Tableau 22 : Effets de l'exposition à des CEM sur la sécrétion de mélatonine et autres paramètres physiologiques chez des animaux de laboratoire	146
Tableau 23 : Effets des CEM-EBF sur la fragmentation de l'ADN	147
Tableau 24 : Effets des CEM-EBF sur l'immunité	149
Tableau 25 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique(CM) sur la physiologie du stress d'animaux modèles ou de rente.	151

Liste des figures

Figure 1 : Force électrique entre particules chargées	16
Figure 2 : Induction magnétique B produite par un courant I à une distance r :	17
Figure 3 : Spectre électromagnétique et les applications associées	19
Figure 4 : Spectre électromagnétique en fréquence et longueur d'onde	19
Figure 5 : Onde électromagnétique (λ) plane sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Les champs électrique (E) et magnétique (B) sont toujours perpendiculaires entre eux dans le vide, et perpendiculaires à la direction de propagation (Z)	20
Figure 6 : Courants induits par les champs électrique et magnétique 50 Hz.....	22
Figure 7 : Résistances corporelles ($k\Omega$) des espèces animales de rente mesurées entre le mufler ou le bec et les membres au moyen d'électrodes (bovins) ou en conditions d'élevage (porcin, ovin, poules et dindes)	23
Figure 8 : Spectre solaire sur terre et dans l'espace.....	25
Figure 9 : Trajets du courant traversant l'animal suite à la décharge provoquée par l'accumulation de charge dans l'abreuvoir (en vert). (a) Tension de contact (V_c)	27
Figure 10 : Enregistrement pendant 24 h du CM dans l'environnement d'une vache laitière (n° 1927, site 24) sur une exploitation proche des lignes THT (2x400 kV, bâtiments à 77 m).....	41
Figure 11 : Histogramme des valeurs d'intensité de CM mesurées sur la vache n° 1927 site 24 (ligne 2x400 kV, bâtiments à 77 m, 1 mesure toutes les 4 sec pendant 24 h).....	41
Figure 12 : Enregistrement pendant 8 h du CM dans l'environnement d'une vache laitière (n° 829, site 16) sur une exploitation à l'écart des lignes HT/THT	42
Figure 13 : Histogramme des valeurs d'intensité de CM mesurées sur la vache n° 829 site 16 (1 mesure toute les 4 sec pendant 8 h).....	42
Figure 14 : Trajets du courant traversant l'animal (en vert): (a) Tension de contact (V_c) et (b) Tension de pas (V_p). I = courant parasite.	47
Figure 15 : Effets des niveaux de courant sur le comportement et la production laitière	60
Figure 16 : Chambre d'exposition contrôlée.....	63

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

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 notamment une étude de l'Inserm, Géocap (Bonnet-Belfais *et al.* 2013), étudiant le rôle de l'exposition aux champs magnétiques d'extrêmement basses fréquences (CEM-EBF) générés par les lignes à haute tension (HT), dans le développement des leucémies aiguës chez l'enfant.

La France a un réseau de lignes à haute tension (63 à 150 kV) et très haute tension (THT) (> 225 kV) très développé et en constante progression : construction de la ligne THT Cotentin-Maine (400 kV, mise en service le 30 avril 2013), projet de ligne entre la France et l'Espagne, etc. Ces lignes électriques émettent des CEM-EBF (à ne pas confondre avec les champs à très hautes fréquences émis par les antennes relais et les téléphones portables) qui sont suspectés d'avoir des impacts sur la santé (électro-hypersensibilité, certaines maladies neurodégénératives, leucémies aiguës chez l'enfant). De nombreuses recherches sont conduites pour caractériser l'exposition de la population générale ainsi que celle des travailleurs aux CEM-EBF, mais les recherches se focalisant sur les conséquences des CEM-EBF sur la santé animale sont plus rares.

Dans ce contexte, les lignes HT et THT suscitent de vives inquiétudes et de nombreuses personnes (éleveurs, associations de protection de la nature, etc.) s'interrogent sur l'impact de ces champs sur la santé des animaux. Le Groupe permanent de sécurité électrique (GPSE) créé en 1999 par le Ministère de l'agriculture en partenariat avec EDF, a exclu tout effet direct des CEM émis par les lignes HT et THT sur les animaux, hormis les conséquences négatives des courants parasites (voir rapport parlementaire n°2558/506, de mai 2010 (Raoul 2010)). Cependant des associations, des collectifs citoyens, des éleveurs rapportent des troubles du comportement (nervosité, agressivité, etc) associés à des modifications des performances zootechniques des animaux (productions laitières inégales, diminutions de poids, ralentissement de croissance ...).

1.2 Objet de la saisine

La saisine transmise par le Ministère des affaires sociales et de la santé, le Ministère du travail de l'emploi, de la formation professionnelle et du dialogue social, le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt comportait deux questions :

- 1- Approfondir l'expertise scientifique relative aux conséquences sur la santé animale et les performances zootechniques
- 2- Procéder à une mise à jour de l'ensemble de l'expertise scientifique sur ce sujet concernant aussi bien la population générale que les travailleurs.

Cette saisine a été divisée en deux : seule la première question sera traitée par cette saisine n° 2013-SA-0037. La seconde question est traitée par la saisine 2013-SA-0038 pilotée par le CES « Agents Physiques ».

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé « Santé Animale » (CES SANT).

L'Anses a confié au groupe de travail « Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences », rattaché au Comité d'experts spécialisé « Santé Animale » (CES SANT) l'instruction de cette saisine.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été régulièrement présentés au CES SANT 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. Les travaux ont été adoptés par le CES « SANT » réuni le 7 avril 2015. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

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) ».

L'expertise a été réalisée en s'appuyant sur les éléments suivants :

- ✓ la lettre de saisine et ses annexes ;
- ✓ les auditions :
 - de M. François Gallouin, Mme Arlette Laval et M. Henri Brugère (Groupement de sécurité électrique)
 - MM. François Deschamps et Jacques Frémaux (Reseau de transport d'électricité)
 - M. Pascal Férey, Président de la FDSEA, Vice-Président de la FNSEA et Président de la Chambre d'agriculture de la Manche
 - M. Bernard Puisset, vétérinaire, géobiologue
- ✓ les publications scientifiques citées en fin de rapport ;
- ✓ les réunions du groupe de travail ;
- ✓ le bilan d'une campagne de mesures réalisée dans le cadre d'une Convention recherche et développement signée avec le laboratoire Exem.

L'avis sur la précédente saisine (2008-006) portant le titre : « Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences » (Afsset 2010) piloté par le Comité d'experts spécialisés Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements a été pris en compte dans le présent document.

1.4 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 de l'Anses (www.anses.fr).

2 Généralités sur les champs électromagnétiques

Dans ce chapitre sont introduites quelques notions d'électromagnétisme qui permettent de comprendre les mécanismes d'interaction entre les CEM et la matière, et d'appréhender ainsi leurs effets sur les animaux. Le rappel de ces notions est volontairement succinct et le lecteur trouvera plus de détails dans le rapport d'expertise collective de 2008 sur les effets sanitaires des CEM-EBF¹ (Afsset 2010).

Par ailleurs, la particularité de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM par rapport à l'exposition humaine tient à l'environnement un peu particulier des fermes d'élevage où les conditions sont plus propices à la manifestation des effets indirects des CEM. En effet, ces derniers peuvent induire des courants et des tensions sur les différents éléments métalliques dans les fermes, à commencer par les bâtiments eux-mêmes, qui se manifestent par des décharges électriques que subissent les animaux au contact des parties métalliques ou par une circulation de courant dans le corps à travers l'application d'une différence de potentiel. Ces effets, qui ne résultent pas de l'exposition directe aux CEM, doivent être également pris en compte dans l'évaluation des effets sanitaires.

2.1 Notions de champ

La notion de champ est fondamentale en physique et nécessite, pour être définie, l'emploi de certaines notions mathématiques assez particulières. De manière générale, on définit un champ lorsque dans une région de l'espace, on attache à chaque point une grandeur physique scalaire ou vectorielle comme par exemple le champ de température dans une portion délimitée de l'espace (champ scalaire) ou le champ de pesanteur (champ vectoriel), qui traduit l'existence d'une force s'exerçant sur tout objet possédant une masse, dirigée vers le centre de la Terre. Le concept de champ permet donc de décrire de manière quantitative les forces qui peuvent s'exercer sur différents objets donnant lieu à des échanges d'énergie.

2.1.1 Champ électromagnétique

Le CEM permet de décrire l'interaction électromagnétique qui s'exerce entre les particules et les corps chargés ; cela correspond à une loi de force à très longue portée qui va donner à l'échelle macroscopique des effets notables. La force d'interaction électromagnétique est considérablement plus intense que la force d'interaction gravitationnelle ; elle est responsable de presque tous les phénomènes qui se produisent à notre échelle, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques.

Le CEM est associé à l'existence simultanée de deux champs vectoriels : un champ électrique E et un champ magnétique H qui se caractérisent par leur amplitude, leur direction et leur sens. Ici, le champ électrique (CE) et le champ magnétique (CM) sont intimement liés, ce qui est très bien décrit par les équations de Maxwell. Ils ont néanmoins des propriétés différentes, qui dépendent en particulier de leur fréquence, c'est-à-dire de la cadence à laquelle leur direction change de sens en fonction du temps. Enfin, ces deux champs ont une origine commune qui est la charge

¹ <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2008et0006Ra.pdf>

électrique, \vec{E} étant associé à l'existence d'une charge électrique alors que \vec{H} est associée au mouvement de cette charge.

2.1.2 Champ électrique

Le champ électrique \vec{E} , créé par une charge électrique Q , exerce son action sur des particules chargées, en mouvement ou non. Ainsi, en régime statique, une charge q située à la distance r de la charge Q subira une force électrique appelée force de Coulomb : $\vec{F} = q \times \vec{E}$. Comme indiqué sur la Figure 1, en fonction du signe des charges Q et q (charge négative comme pour un électron ou positive comme pour un proton), les forces électriques sont répulsives si elles sont de même signe ou attractives si elles sont de signes opposés. En fait, une charge crée un CE en tout point de l'espace, qui est 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. Enfin, l'intensité du CE s'exprime en volts par mètre (V/m). A titre d'exemple, le champ électrique naturel à la surface de la terre est de l'ordre de 100 à 150 V/m et peut devenir relativement important par temps d'orage, de 15 à 20 kV/m.

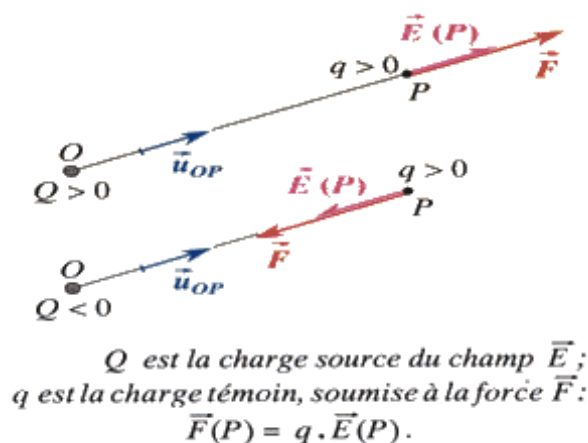


Figure 1 : Force électrique entre particules chargées ²

2.1.3 Champ magnétique

Au mouvement des charges électriques, on associe un champ magnétique \vec{H} qui va exercer son action sur des particules chargées, elles-mêmes en mouvement, ou sur des objets magnétiques. Il est important de comprendre que ce champ n'existe pas si les charges sont immobiles. Le CM 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. \vec{H} s'exprime en Ampères/mètre (A/m). Cependant, on utilise souvent la quantité \vec{B} , appelée induction magnétique ou densité de flux magnétique, pour le quantifier, qui ne diffère du champ \vec{H} que par une constante de proportionnalité μ , qui est la perméabilité magnétique. \vec{B} s'exprime en teslas (T). La Figure 2 illustre le champ induit par la circulation d'un courant dans une portion d'un conducteur.

² Figure extraite de http://protontherapie.free.fr/cyclotron_annexe_1.html

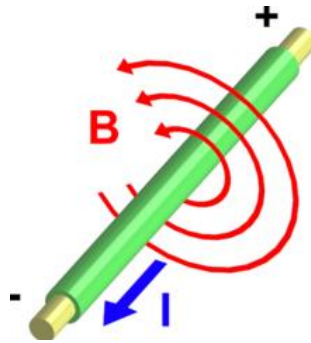


Figure 2 : Induction magnétique B produite par un courant I à une distance r :
 $H = \mu B$ et $H = I / (2\pi r)^3$

Pour donner des ordres de grandeur, le champ magnétique terrestre (CMT), créé par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre, est de l'ordre de $50 \mu\text{T}$ en France, dont la plus grande composante est verticale (environ $40 \mu\text{T}$). Ce champ est un champ statique mais de faibles variations dues à différents phénomènes naturels sont observées en permanence. On peut également rencontrer des CM très faibles comme ceux produits par l'activité du cerveau humain (de l'ordre de 10^{-13}T) ou des champs beaucoup plus élevés de quelques teslas, produits par exemple par les appareils d'IRM (Imagerie par résonance magnétique).

³ Figure extraite de "[Electromagnetism](#)". Sous licence Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons

2.2 Grandeurs physiques

Pour appréhender les CEM dont l'origine, tout comme les effets, renvoient aux courants et tensions électriques, il est important d'avoir en tête les quelques grandeurs physiques utiles et leurs unités dans le Système international, qui sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Quelques grandeurs physiques et leurs unités

Grandeur physique	Unité du système international (autres unités)
Tension électrique (U)	volt (V)
Courant électrique (I)	ampère (A)
Puissance électrique (P ou P_{el})	watt (W)
Energie électrique (W ou W_{el})	joule (J) (watt-heure (Wh) électronvolt (eV))
Champ électrique (E)	volt par mètre (V/m)
Champ magnétique (H)	ampère par mètre (A/m)
Induction magnétique (B)	tesla (T) (gauss (G) : $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} = 0,1 \text{ mT}$)
Flux magnétique (Φ ou Φ_B)	weber (Wb)
Fréquence (f ou ν)	hertz (Hz)
Longueur d'onde (λ)	mètre (m)
Force (F)	newton (N)

2.3 Spectre électromagnétique

Les champs électrique et magnétique peuvent être statiques mais peuvent varier également au cours du temps. Ces champs peuvent en effet osciller dans le cas où les charges électriques oscillent elles-mêmes dans le circuit qui les transporte. La grandeur physique caractérisant les oscillations dans le temps des champs électrique et magnétique est la fréquence f .

Seul un champ statique restera purement électrique ou purement magnétique. En revanche, les champs variables sont, à distance suffisante de la source, des ondes qui se propagent à la vitesse de la lumière.

Les fréquences des CEM couvrent un très large spectre : des plus élevées pour les rayonnements gamma (10^{23} Hz), aux plus faibles oscillations bien inférieures au Hz pour des phénomènes liés à l'activité de la Terre. Le spectre visible se situe autour de fréquences de l'ordre de 10^{14} Hz. La Figure 3 illustre les différentes bandes de fréquences du spectre électromagnétique associées à quelques applications typiques. Dans le cadre de ce rapport, la gamme des CEM-EBF considérés est définie par le domaine fréquentiel suivant : $0 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ kHz}$. Cependant, pour tenir compte des fréquences harmoniques des signaux, on peut couvrir la gamme de fréquence jusqu'à 10 kHz.

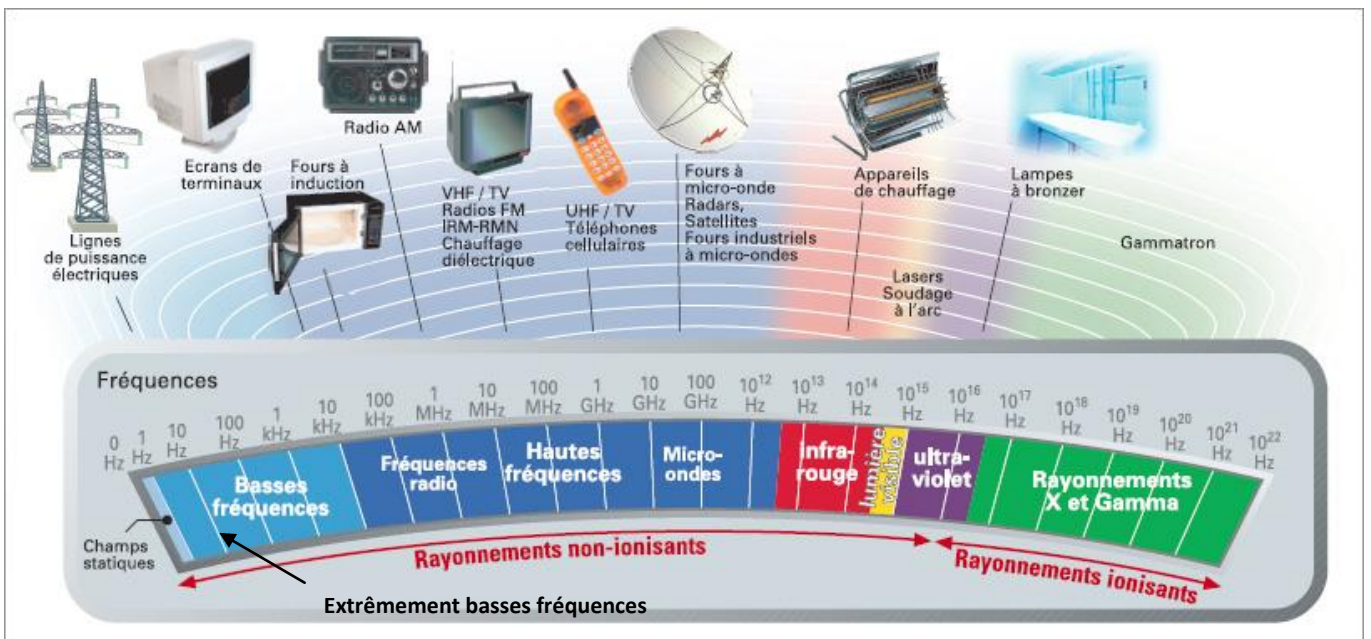


Figure 3 : Spectre électromagnétique et les applications associées (Source INRS)

Au cours d'une période temporelle correspondant à l'inverse de la fréquence, l'onde électromagnétique va parcourir une distance caractéristique qui est la longueur d'onde λ . C'est la distance entre 2 points de l'espace pour lesquels le champ a la même valeur. Elle est reliée à la fréquence f du signal par la relation $\lambda = c / f$, où c est la vitesse de la lumière. La Figure 4 donne pour le spectre électromagnétique, la correspondance en fréquence et en longueur d'onde. Ainsi, pour une onde de fréquence 50 Hz, la longueur d'onde λ dans le vide vaut 6 000 km.

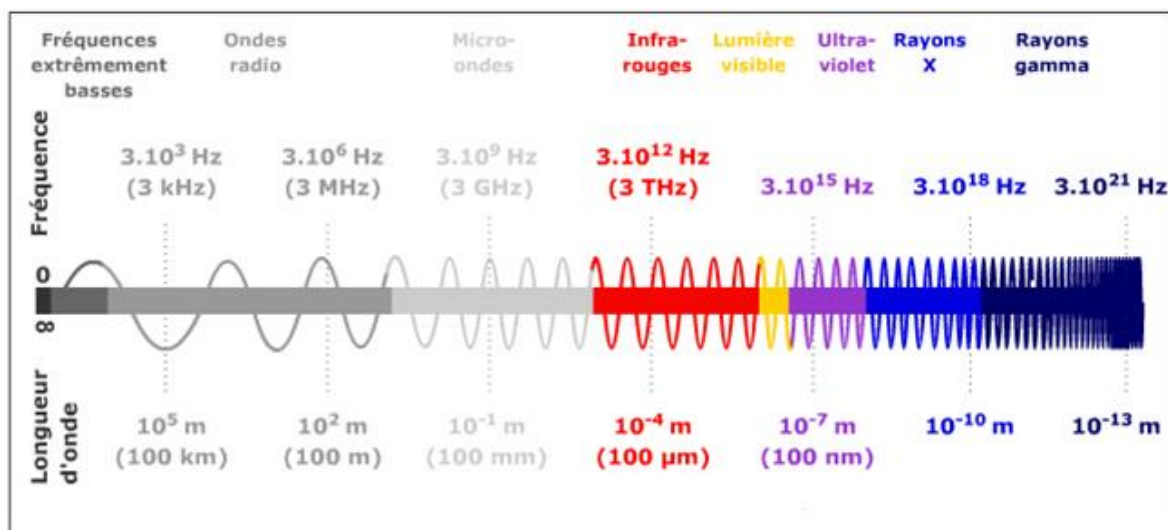


Figure 4 : Spectre électromagnétique en fréquence et longueur d'onde (Source BBEMG)

La Figure 5 représente une onde électromagnétique à un instant donné sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Elle est composée par définition d'un CE et d'un CM variables dans le temps et dans l'espace, liés par les équations de Maxwell.

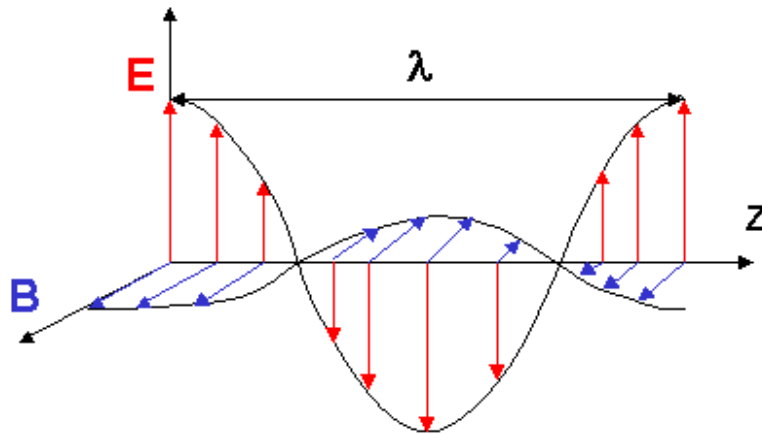


Figure 5 : Onde électromagnétique (λ) plane sur sa trajectoire rectiligne suivie dans le vide. Les champs électrique (E) et magnétique (B) sont toujours perpendiculaires entre eux dans le vide, et perpendiculaires à la direction de propagation (Z) ⁴

De façon générale, les propriétés du CEM diffèrent beaucoup en fonction de la distance à la source de rayonnement, de la longueur d'onde, des caractéristiques de la structure rayonnante et de l'environnement. On distingue trois zones autour d'une source d'émission de CEM :

- La zone de champ très proche qui est située à une fraction de la longueur d'onde de la source (généralement entourant immédiatement la source) appelée zone d'évanescence ou de Rayleigh. L'onde électromagnétique n'est pas formée dans cette région et il n'y a pas de relation simple entre les deux champs électrique et magnétique, qui peuvent coexister séparément.
- La zone de transition, ou région de Fresnel, qui assure la transition entre la zone de Rayleigh et la zone suivante, appelée zone de champ lointain. Dans cet espace, situé un peu plus loin autour de la structure rayonnante, le phénomène de propagation commence à apparaître mais on dit que l'onde n'est pas encore formée.
- Enfin, la zone de champ lointain, ou région de Fraunhofer, où les propriétés du CEM sont bien établies et où apparaissent les phénomènes classiques de propagation des ondes électromagnétiques. Cette région se situe généralement à plusieurs longueurs d'onde du périmètre de la structure avec un CEM dont l'amplitude des vecteurs CE et CM diminue lorsque la distance à l'antenne augmente, et s'annule à l'infini.

Dans la zone de champ lointain, on ne peut pas dissocier le CE et le CM, et on parlera exclusivement de champ électromagnétique. Pour une onde électromagnétique de fréquence f de 900 MHz, la zone de champ lointain sera située à une distance de l'ordre de quelques centimètres correspondant à la longueur d'onde ($\lambda=c/f$, où c est la vitesse de la lumière), alors qu'elle est de quelques milliers de kilomètres pour une onde à 50 Hz (environ 6 000 km). Ainsi à 50 Hz, la plupart des mesures s'effectuant à des distances largement inférieures, on se retrouve dans la zone de champ proche où le CE ou le CM peuvent exister sous forme isolée l'un de l'autre et peuvent être considérés séparément. Ainsi, bien qu'on parle de mesures de CEM-EBF, on traitera de façon séparée les valeurs de CM et celles de CE.

⁴ Figure extraite de : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/imagerie-medicale-radiographie-principe.xml>

2.4 Interactions liées aux champs électromagnétiques

L'action des CE électrique et CM magnétique sur les objets dépend de la nature statique ou variable de ces champs ainsi que de la nature de l'objet lui-même.

2.4.1 Interactions liées au champ électrique

Le CE exerce une force sur les particules chargées. C'est le cas dans les matériaux conducteurs où des courants de conduction peuvent se développer sous l'effet d'un CE statique ou variable (le déplacement des charges est à l'origine du courant électrique). En revanche, seul un CE variable peut produire un courant, dit de déplacement, dans les matériaux isolants (le CE crée des dipôles par polarisation des molécules comme dans le cas de l'eau H₂O). Ainsi, un CE de 50 Hz peut induire des courants de conduction et de déplacement oscillant alternativement dans les deux directions, à la fréquence du champ inducteur.

2.4.2 Interactions liées au champ magnétique

Le CM exerce une force sur les charges en mouvement. Si le CM est statique, seule la force de Laplace peut s'exercer sur des fils conducteurs sans créer un courant électrique. En revanche, un CM variable va créer une force électromotrice aux bornes du conducteur et donc un champ électrique qui donnera lieu à un courant induit (Loi de Faraday).

2.4.3 Effets sur le corps humain et les animaux d'élevage

Le corps humain peut être considéré comme un bon conducteur avec des impédances typiques de l'ordre de 1,5 k Ω . Dans un champ variable, par exemple le champ sinusoïdal à 50 Hz de la Figure 6, le corps sera parcouru par un courant à la même fréquence que celle du champ ambiant (électrique ou magnétique). Le CE externe variable ne pénètre que très partiellement le corps (quelques mV/m dans le corps pour un CE externe de quelques kV/m). On obtient une migration des charges à la surface du corps à l'origine de courants superficiels et un courant résiduel à l'intérieur du corps. Le CM 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).

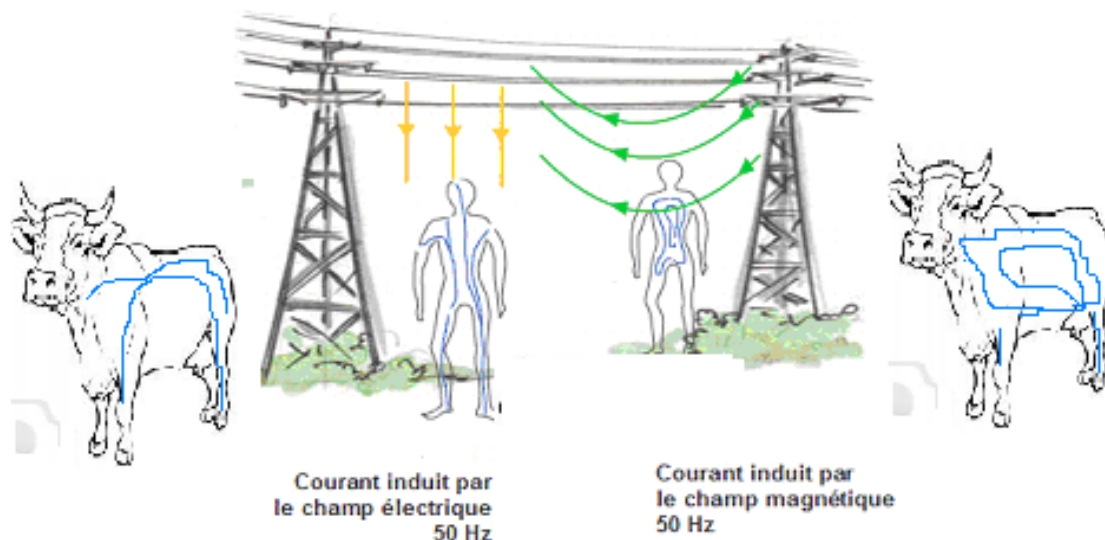


Figure 6 : Courants induits par les champs électrique et magnétique 50 Hz (Source BBEMG⁵)

Comme pour le corps humain, les animaux d'élevage peuvent également subir les actions directes des CE et CM très basses fréquences, les mécanismes décrits plus haut s'appliquant de la même façon. Cependant, ces effets dépendent de la résistance électrique corporelle des différentes espèces de rente. Une forte variation existe entre ces espèces, avec une résistance électrique qui décroît des volailles, aux ovins, porcins et bovins (voir Figure 7). Cette résistance peut également varier en fonction de facteurs de nature individuelle (poids, trajet parcouru selon les points d'entrée et de sortie) et environnementale (fréquence du courant, conductivité des matériaux de contact de type métal, plastique ou béton, conditions ambiantes telles que la présence d'humidité).

Ainsi Robert *et al.* soulignent une diminution de la résistance électrique corporelle totale avec la croissance des porcs âgés de 9 à 22 semaines, cette diminution est liée à l'augmentation du tissu adipeux et à l'augmentation de la pression des onglons exercée sur le sol. Il est montré aussi un effet des caractéristiques du sol : la résistance corporelle (groin-onglon) diminuant entre 10 et 22 semaines d'âge de 2 786 à 861 Ω chez les porcs logés sur sol sec, et de 954 à 569 Ω chez les porcs logés sur sol humide (Robert *et al.* 1993). Pour les bovins, des valeurs plus précises sont données dans le Tableau 2.

⁵ <http://www.bbemg.be/fr/50hz-information-generale/champs-electriques-magnetiques/electromagnetisme.html>

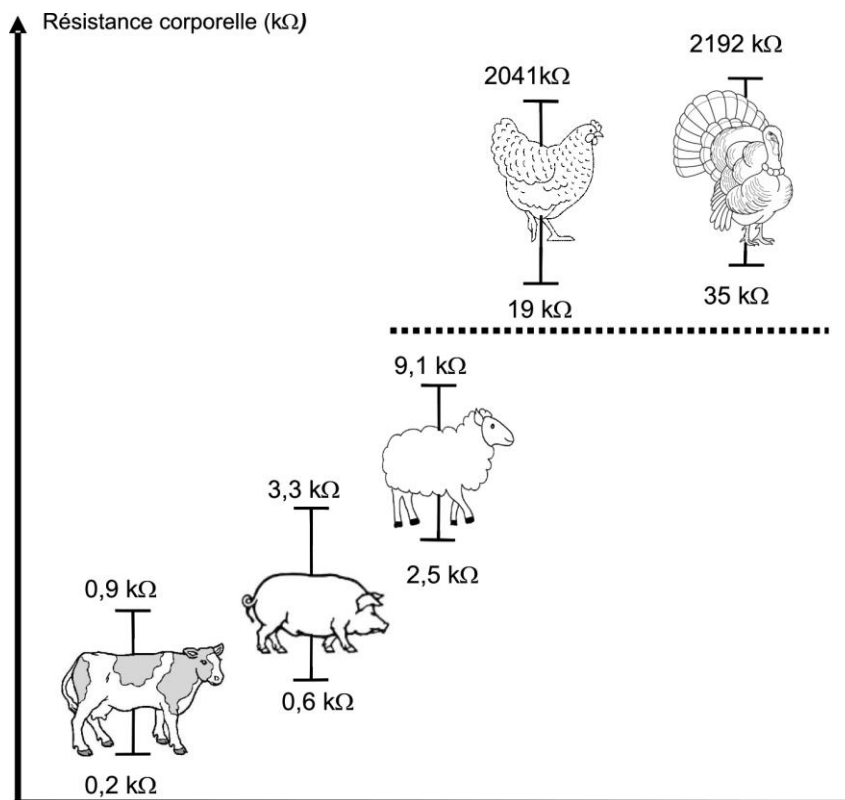


Figure 7 : Résistances corporelles (kΩ) des espèces animales de rente mesurées entre le mufle ou le bec et les membres au moyen d'électrodes (bovins) ou en conditions d'élevage (porcin, ovin, poules et dindes), adapté de (Rigalma *et al.* 2009)

Tableau 2 : Valeurs moyennes de la résistance électrique, mesurée chez la vache laitière en fonction du trajet parcouru par le courant électrique [adapté de (Appleman et Gustafson 1985)].

Trajet du courant	Résistance (Ω) Moy (min-max)	Fréquence du courant (Hz)	Références
Mufle- sabots avant et arrière	350 (324-393)	60	(Craine 1975)
	321 (244-525)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Mufle- sabots arrière	475 (345-776)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Mufle- sabots avant	624 (420-851)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Membres antérieurs-membres postérieurs	300 (250-405)	60	(Lefcourt et Akers 1982)
	362 (302-412)	60	(Lefcourt <i>et al.</i> 1985)
Sabots avant-sabots arrière	734 (496-1152)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Croupe- sabots avant et arrière	680 (420-1220)	50	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
Poitrine - sabots avant et arrière	980 (700-1230)	50	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
	1000	50	(Woolford 1972)
Trayon - mufle	433 (294-713)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Trayon-sabots avant et arrière	594 (402-953)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
	880 (640-1150)	50	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
Trayon - sabots arrière	710 (503- 1203)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Trayon - sabots avant	874 (593-1508)	60	(Norell <i>et al.</i> 1982)
Tous les trayons - sabots avant et arrière	1320 (860-1960)	50	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
	1000	50	(Phillips et Parkinson 1963)
Mamelle - sabots avant et arrière	630 (510-980)	60	(Henke Drenkard <i>et al.</i> 1985)
Mufle (abreuvoir) - sabots	537 (371-988)	50	(Rigalma 2009)
Sabots avant-sabots arrière	1000	60	(Reinemann <i>et al.</i> 2003)
Mufle-sabots avant et arrière	500 à 1500	60	(Reinemann <i>et al.</i> 2005)

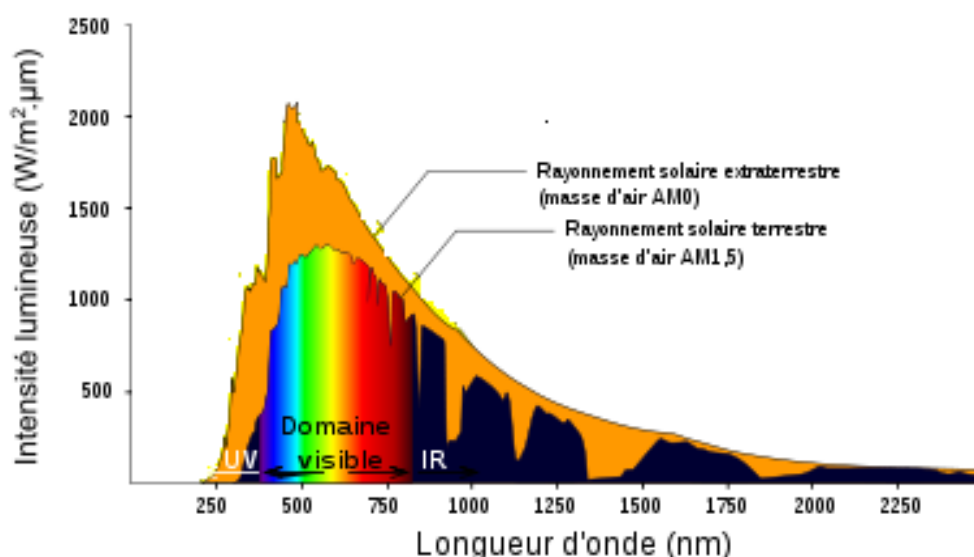
La résistance électrique moyenne d'une vache est de l'ordre de 500 Ω , mais elle peut varier de 300 à 1 500 Ω selon le trajet emprunté par le courant et les conditions d'élevage. Ainsi, un sol humide (conducteur du courant) imprégné de déjections (électrolytes conducteurs) peut considérablement favoriser le passage du courant. Néanmoins, Norell *et al.* ne montrent pas chez la vache laitière un impact de la présence d'humidité au sol sur la résistance corporelle totale (Norell *et al.* 1982). L'animal, parfois attaché par une chaîne métallique ou en contact avec des barrières en métal, se trouve également dans des conditions favorables au passage possible du courant au travers du corps (voir Figure 9), ce dernier étant d'autant plus élevé que la résistance corporelle de l'animal est faible. Pour que l'animal réagisse au courant produit, la source de tension doit engendrer une circulation de courant d'une intensité supérieure au seuil de tolérance de l'animal. La notion de résistance corporelle est donc déterminante dans la sensation perçue par l'animal.

2.5 Sources de champs électromagnétiques en élevage

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

2.5.1 Sources naturelles

La première source naturelle de CEM et la plus intense est le soleil. La Figure 8 montre la répartition de l'énergie solaire en fonction de la longueur d'onde et donc de la fréquence, avec un maximum d'intensité se trouvant dans le domaine visible (400-800 nm). On peut observer que le spectre solaire reçu au niveau de la terre (masse d'air AM1,5) est sensiblement différent de celui mesuré dans l'espace (masse d'air AM0). En effet, l'atmosphère terrestre bloque les rayonnements les plus énergétiques (rayons X et γ) et dangereux pour la vie, mais aussi, avec l'ionosphère, une partie des rayonnements dans le domaine des ondes radio.



Le champ magnétique terrestre (CMT) nous protège également des effets nocifs du vent solaire au niveau de la magnétosphère située à très haute altitude. Cependant, de nombreux phénomènes magnétiques naturels sont perceptibles sur Terre, comme celui, spectaculaire, des aurores boréales. De plus, de nombreux orages recouvrent en permanence la surface du globe, ce qui en fait un système dynamique dans lequel les variations du CM et du CE dues aux éclairs sont permanentes et variées. Les gammes de fréquences des différents phénomènes couvrent l'ensemble du spectre radioélectrique. Les intensités dépendent des phénomènes physiques sous-jacents.

⁶ Figure extraite de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonne_Strahlungsintensitaet-fr.svg#filelinks

2.5.2 Sources artificielles – identification des sources en élevage

Les CEM peuvent être également générés par des sources artificielles. Nous présentons ci-dessous les principales sources qui peuvent être à l'origine de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM :

- **Les lignes de transport et de distribution d'électricité** : le réseau des lignes de transport et de distribution de l'électricité en France est très développé, et constitue donc une source de champs à laquelle sont exposés les animaux dans un certain nombre de fermes d'élevage. On distingue deux types de réseaux : le réseau de transport HT et THT (50 kV - 400 kV) géré par RTE, et le réseau de distribution de la moyenne tension (1 kV - 50 kV) géré par ERDF.

En fonction de la configuration des lignes de transport, la courbe de charge aura une allure différente avec des courants qui varient en intensité et en périodicité. Ainsi, une ligne d'évacuation de centrale nucléaire aura une courbe pratiquement constante dans le temps, la production de la centrale étant relativement constante alors qu'au contraire une ligne d'évacuation de barrage hydraulique aura une courbe très hachée avec des valeurs très faibles (voire nulles) la plupart du temps et quelques pics lorsque le barrage fonctionne. C'est également le cas pour toutes les centrales qui servent à faire face à des besoins ponctuels comme les pics de consommation. Enfin, une ligne d'alimentation d'une ville aura un transit très cyclique entre le jour et la nuit, entre la semaine et le week-end, entre l'été et l'hiver.

Le CM émis par les réseaux de transport et de distribution d'électricité est proportionnel à l'intensité du courant circulant dans les câbles. Comme le transport se fait en triphasé équilibré, le CM est inversement proportionnel au carré de la distance aux câbles (décroissance en $1/d^2$, si d représente la distance au câble). Dans cette famille, les réseaux torsadés (réseaux isolés 380 V et câbles 20 kV) constituent un cas particulier. Leur disposition en torsade réduit le CM à un niveau pratiquement négligeable. Les valeurs théoriques sous une ligne HT de 225 kV sont de 3 000 V/m pour le CE et de 20 μ T pour le CM. Sous une ligne THT de 400 kV le CE théorique est de 5 000 V/m et le CM de 30 μ T.

- **Les lignes ferroviaires** : l'électrification du réseau ferré de France pour la traction électrique se fait soit en alternatif 50 Hz à 25 kV, soit en continu à 1 500 V. Les CEM générés par ce système ferroviaire peuvent donc être à très basses fréquences (50 Hz) ou statiques créés par le système d'électrification à courant continu.

D'autres types d'électrification existent mais ne sont utilisés que pour certaines lignes ferroviaires secondaires. Il s'agit d'alimentation en courant continu qui varie entre 600 V et 850 V.

- **Les sources en élevage** : les CEM-EBF sont également présents dans l'environnement des fermes d'élevage où les sources d'exposition sont de plus en plus nombreuses et de plus en plus répandues : moteur du tank à lait, pompes à vide de machine à traire, différents compresseurs et moteurs, transformateurs, alternateurs, systèmes d'identification, installations de production électrique, dispositifs d'éclairage et de chauffage, ventilation, chaîne d'alimentation, etc.

Les données sur les valeurs de champs produits par ces appareils sont mal connues car il n'existe pas de mesures spécifiques réalisées pour déterminer l'exposition des animaux d'élevage aux CEM, à l'instar de ce qui a été réalisé pour les appareils domestiques. Cependant, ces CEM devraient être relativement localisés.

La partie 3.3 de ce rapport (page 31) présente les principaux résultats d'une étude de terrain visant à caractériser les sources de champs électrique et magnétique sur un échantillon (non représentatif) d'exploitations agricoles (bovins, porcs, volailles) situées ou non à proximité de lignes HT et THT.

2.6 Champs électromagnétiques et courants parasites

Les travaux sur les effets des CEM sur le comportement des animaux, couvrent deux types d'effets des CEM-EBF :

1/ Les effets directs des champs associés à la présence de lignes HT/THT ou générés par la proximité de matériels créant des champs induits ;

2/ Les effets indirects des champs à travers les courants et les tensions parasites. Les courants parasites sont des courants électriques, souvent faibles, en général alternatifs, de la fréquence du réseau (50 Hz en Europe, 60 Hz aux Etats-Unis et au Canada), mais il n'est pas rare que ces courants soient continus ou semi-redressés suite à l'effet semi-conducteur de certains matériaux (béton, oxydes métalliques, sols particuliers contenant des métaux, etc) traversés par le courant alternatif d'origine. Ils peuvent circuler dans les lieux de vie des animaux et sont détectables sur les différents éléments métalliques présents dans les fermes, à commencer par les bâtiments eux-mêmes, les abreuvoirs, les cornadis, les cages, les systèmes d'alimentation, etc. Les CEM peuvent être à l'origine de ces courants et tensions parasites : le champ magnétique crée un courant circulant dans les conducteurs métalliques selon le principe équivalent de la Figure 6 (page 22) et le champ électrique peut être à l'origine d'une accumulation locale de charges électriques (Figure 9). Cela peut se traduire par des décharges électriques que subissent les animaux au contact de ces parties métalliques ou par une circulation de courant à travers l'application d'une différence de potentiel (voir Figure 14, page 47). Dans les élevages, la présence de nombreux moteurs, de mécanismes de contrôle et de circuits électriques, dans un environnement où les sols sont souvent mouillés, peut entraîner des pertes électriques dues à des installations souvent défectueuses et l'apparition de tensions parasites.

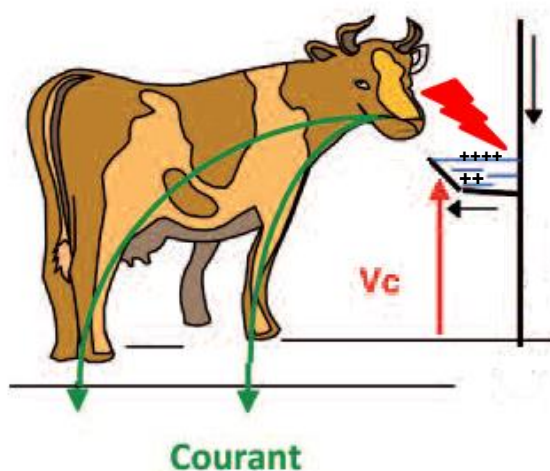


Figure 9 : Trajets du courant traversant l'animal suite à la décharge provoquée par l'accumulation de charge dans l'abreuvoir (en vert). (a) Tension de contact (V_c). D'après (Rigalma *et al.* 2009)

En plus des CEM, d'autres sources peuvent être à l'origine des courants parasites à proximité des élevages et pouvant circuler dans les parois métalliques des bâtiments agricoles et même dans les sols. On peut citer les courants dus aux défauts des installations électriques, à une mauvaise conception de l'installation de clôture électrique ou encore le courant de retour des lignes de transport d'électricité, qui apparaît lorsque l'équilibre des trois phases n'est plus assuré, comme par exemple sous l'effet de la foudre⁷. Il faut noter que, dans la plupart des cas, l'origine de ces courants parasites vient de l'environnement électrique des élevages qui est souvent moins maîtrisé, avec des installations ne répondant pas, dans beaucoup de cas, aux normes de mise à la terre des bâtiments et des aménagements métalliques [audition des membres du GPSE et (GPSE 2003)].

Les effets de ces courants parasites peuvent être d'autant plus prononcés que la résistance corporelle des animaux est faible et que les animaux évoluent dans des environnements relativement humides avec des sols souvent mouillés, comme c'est le cas notamment dans les élevages bovins laitiers et porcins. Lorsque ces courants parasites créés atteignent une tension suffisante, ils peuvent alors traverser le corps de l'animal avec des effets potentiels sur sa santé et son comportement. Toutefois, il n'est pas facile, dans la plupart des cas, de faire la part des CEM dans les manifestations cliniques rapportées à l'action des courants parasites (électropathologie) dans les élevages.

⁷ La foudre n'est pas un phénomène rare, la France reçoit en moyenne un million d'impacts de foudre par an. Voir l'activité foudre sur la France sur le site de l'Observatoire français des tornades et orages violents (Keraunos.org).

3 Exposition aux champs électromagnétiques

L'évaluation des effets des CEM sur le comportement, la santé et les performances des animaux d'élevage implique de disposer de méthodes permettant d'estimer l'exposition des animaux et d'identifier les paramètres pertinents de cette exposition.

3.1 Notion d'exposition

La notion d'exposition est utilisée aussi bien pour caractériser l'intensité du rayonnement électromagnétique reçu par les personnes, par exemple dans le cadre d'études d'exposition individuelle ou d'études épidémiologiques, que pour des modèles animaux ou cellulaires dans le cadre d'études biologiques qui cherchent à identifier des effets. Il est question d'exposition « aiguë » lorsque la durée de l'exposition est courte (quelques minutes à plusieurs heures selon le modèle) et d'exposition « chronique » lorsque cette durée s'étale pendant une grande partie de la vie de l'animal ou de l'humain. Compte tenu de la durée de vie d'un rat ou d'une souris, une exposition d'un an ou deux est considérée comme chronique. Entre les deux, pour quelques jours à quelques mois, l'exposition est dite semi-chronique (ou subchronique). S'il s'agit de cellules en culture, ces notions de chronique ou semi-chronique sont difficilement transposables, néanmoins, il est question d'exposition aiguë pour quelques minutes ou quelques heures, et chronique ou de longue durée si l'exposition persiste durant plusieurs générations de cellules.

3.2 Méthodes d'évaluation de l'exposition

L'évaluation de l'exposition des animaux d'élevage consiste d'abord à identifier les sources de CEM auxquelles ces animaux sont potentiellement exposés. Elle doit aboutir à la connaissance de la proportion de chaque espèce animale exposée et des valeurs de CEM auxquelles cette proportion est soumise. Cette évaluation de l'exposition constitue un des éléments importants d'appréciation et de gestion du risque sanitaire potentiel. Dans ce cadre, les questions importantes à se poser sont la durée et la fréquence des mesures, l'influence de la saison ou du cycle hebdomadaire, la reproductibilité dans le temps et la connaissance de l'historique de l'exposition. De fait, la grande variabilité de l'exposition des personnes comme des animaux d'élevage aux CEM dans le temps met l'accent sur l'importance de mesures individuelles prolongées pour une estimation rigoureuse de l'exposition.

Bien que très peu de données existent pour les animaux d'élevage, les procédures d'évaluation de l'exposition aux CEM-EBF ne sont pas très différentes de celles appliquées à l'évaluation de l'exposition humaine. En effet, de la même façon, l'évaluation peut être basée sur des méthodes indirectes à partir de calculs, mais également à partir de mesures réelles effectuées soit à poste fixe à l'intérieur et l'extérieur des fermes d'élevage, soit en équipant les animaux d'enregistreurs portables. L'objectif est alors de caractériser l'exposition des animaux d'élevage en tenant compte de sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

De plus, il est important de bien définir les paramètres physiques qui peuvent lier l'exposition à l'impact sur la santé. En effet, on peut évaluer plusieurs paramètres tels que l'exposition moyenne

pondérée (Preston-Martin *et al.* 1996), la moyenne arithmétique, la moyenne géométrique⁸ ou la médiane des valeurs mesurées (London *et al.* 1991; Vistnes *et al.* 1997). On peut également mesurer les pics d'exposition, la durée d'exposition au-delà d'un certain niveau de champ ou encore les variations rapides de flux magnétique. Il s'agit donc de définir les paramètres qui vont le mieux refléter un possible effet biologique des CEM.⁹

Une première méthode de calcul appliquée aux lieux d'habitation et qui pourrait être transposée aux bâtiments agricoles, consiste à classer le lieu en fonction de sa distance à un type particulier de source de transport de courant (Kaune et Savitz 1994; Wertheimer et Leeper 1979). Cette méthode reste indicative de l'exposition puisqu'elle ne considère que les CM générés par le système de distribution « visible » de l'électricité et ne prend pas en compte les sources à l'intérieur du bâtiment. On peut également calculer le CEM généré par les lignes électriques connaissant leurs caractéristiques géométriques et les courants qui y circulent (Feychting et Ahlbom 1993; London *et al.* 1991; Vistnes *et al.* 1997). Les résultats de ces calculs sont parfaitement en cohérence avec 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 CEM produit par une ligne en utilisant l'historique de sa charge (McBride *et al.* 1999). L'exposition cumulée est alors évaluée indirectement en multipliant le nombre de mois d'exposition par le niveau moyen du CEM calculé.

En plus des méthodes basées sur le calcul des CEM, l'exposition peut être estimée à partir de mesures en des lieux donnés à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments : en stabulation, à proximité des abreuvoirs, salle de traite, etc. On procède alors à des mesures en ces points fixes, soit ponctuelles dans le temps et de courte durée, soit en continu sur 24 ou 48 heures qui peuvent être plus représentatives de l'exposition (Dockerty *et al.* 1998; Schoenfeld *et al.* 1999). Comme pour les humains, l'exposition peut également être mesurée directement à l'aide de mesures individuelles en utilisant des magnétomètres portatifs qui permettent de mesurer les CM 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 prend en compte les CEM produits par toutes les sources potentielles sans les distinguer.

⁸ La moyenne géométrique est plus adaptée que la moyenne arithmétique pour rendre compte d'une exposition à des événements dispersés dans le temps.

⁹ La notion de dose, ne doit pas être confondue avec la dose utilisée dans le domaine des rayonnements ionisants, ici elle se réfère plutôt à une notion d'intensité. Les effets des expositions aux rayonnements non ionisants ne se cumulent pas, *a priori*.

3.3 Etude de l'exposition des animaux d'élevage aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences, sur 30 exploitations en France

L'analyse de la bibliographie a montré que peu de données de terrain étaient disponibles concernant les mesures de CEM-EBF en élevage et par conséquent le GT manquait d'information sur le niveau d'exposition à ces champs des animaux d'élevage. Il a donc été décidé de lancer une étude pour mesurer les CEM-EBF en exploitation agricole. L'objectif de cette étude était d'avoir un premier inventaire des niveaux des CEM-EBF dans des exploitations agricoles - situées pour certaines d'entre elles sous des lignes HT ou THT et pour d'autres éloignées de ces lignes - et représentant différents types de production (vaches laitières, porcs et volailles).

3.3.1 Présentation de l'étude

Si les lignes HT ou THT sont susceptibles de constituer une source de CEM-EBF, d'autres installations propres aux élevages contribuent à ce type d'émission (installations et appareils électriques, moteurs, etc.). En effet, les exploitations d'élevage sont de plus en plus équipées d'installations et d'appareils électriques qui assurent des fonctions très diverses : la traite mécanisée des vaches laitières, la distribution automatique de l'alimentation, les systèmes de régulation de l'air ambiant, etc. Tous ces appareils sont susceptibles de générer des champs électriques et magnétiques qui contribuent au niveau moyen des CEM à l'intérieur des bâtiments agricoles. Afin de déterminer le niveau d'exposition des animaux d'élevage, il faut donc caractériser et mesurer non seulement le niveau moyen du champ électrique et magnétique dans l'environnement ambiant, mais également la contribution individuelle de chacun de ces appareils.

Compte tenu de la diversité de ces appareils et les dimensions importantes de certains d'entre eux qui rendent difficile la mise en œuvre des mesures en laboratoire, celles-ci ne peuvent être envisagées qu'*in situ*. Cependant, les mesures *in situ* posent un certain nombre de problèmes liés à une maîtrise imparfaite des conditions de mesure et notamment pour les champs électriques émis par les appareils individuels. En effet, ces mesures sont facilement influencées par l'environnement électromagnétique proche autour de l'appareil à caractériser. Il était donc important de prendre certaines précautions dans le protocole de mesure pour limiter les perturbations de cet environnement.

Notons que cette étude n'avait pas pour but d'aborder la question de l'impact sanitaire éventuel des CEM-EBF sur les animaux.

Les mesures de CEM-EBF dans les fermes d'élevage ont été effectuées dans le cadre d'une convention de recherche et développement (CRD) passée entre l'Anses et le Laboratoire Exem, accrédité COFRAC pour la mesure du champ magnétique basse fréquence. Le laboratoire Exem a réalisé les mesures suivantes :

- Une cartographie du CM selon le protocole UTE C99-132¹⁰ (AFNOR 2010) sur l'ensemble de l'exploitation (intérieur et extérieur) avec l'appareil Narda EHP 50 C. Les points

¹⁰ UTE C99-132 « Protocole pour la mesure *in situ* des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité » édition Novembre 2010 et Additif RTE au protocole UTE C99-132 Mesure de champ magnétique 50 Hz en application du décret 11-1697 (NT-CTO-12-00146 Indice 1).

extérieurs ont été choisis en fonction de la proximité de la ligne HT ou THT et les zones les plus éloignées n'ont pas été cartographiées afin de réduire le temps des mesures dans les exploitations (ces mesures devant être réalisées sur une seule journée, du fait de la disponibilité des éleveurs). Lors de cette cartographie, les CE ont été également relevés. Il est important de souligner ici que ces mesures de CE sont extrêmement délicates à réaliser dans des environnements non parfaitement contrôlés. En effet, la mesure peut être influencée par la proximité, par rapport à la sonde de mesure, de tout objet et même de l'opérateur et elle dépend également des conditions environnementales comme la température et l'humidité. La variabilité de ces mesures peut être donc très importante même si la chaîne de mesure est parfaitement fiable.

- Des mesures de CM à proximité de certains appareils identifiés par les experts (Narda EHP 50 C). Les mesures ont été faites au plus près de l'équipement en cherchant d'abord la hauteur à laquelle la valeur maximale était observée pour un éloignement de 30 cm. Une fois le maximum trouvé, les champs magnétiques ont été relevés pour différents éloignements (de 30 cm à 1,50 m) et sur une fréquence allant de 40 Hz à 10 kHz.
- Des mesures en continu de CM en utilisant des appareils portables placés sur les bovins. Sur les 10 élevages de bovins laitiers, un ou deux animaux par élevage ont été équipés d'appareils transportables (EMDEX Lite), pendant 8 h pour les exploitations éloignées de lignes de transport d'électricité et sur 24 h pour les exploitations proches des lignes HT ou THT, afin d'évaluer les variations d'exposition des animaux sur ces durées.

3.3.2 Principaux résultats

Entre le 27 juin 2014 et le 11 septembre 2014, 30 exploitations sélectionnées par les experts du GT et sur le principe du volontariat, ont participé aux mesures de CEM-EBF effectuées par le laboratoire Exem. Ces exploitations représentaient différents types de production : vaches laitières, porcs et volailles. Dix exploitations de vaches laitières ont été visitées. La taille de ces exploitations variait de 35 à 400 vaches laitières avec en conséquence un nombre d'équipements variable. Pour les porcs, les mesures ont été effectuées dans 10 élevages naisseurs-engraisseurs avec une taille d'élevage variant de 100 à 400 truies. Enfin, 9 exploitations de poules pondeuses (en production Bio ou Label rouge ou en cage) et un couvoir ont été visités.

Dix-sept exploitations étaient situées à proximité (< 200 m) d'une ligne de transport d'électricité (de 63 kV à 400 kV), les treize autres étant situées à l'écart des lignes de transport d'électricité. Certaines exploitations sélectionnées étaient situées juste en dessous des câbles électriques avec parfois le passage de plusieurs lignes à proximité.

3.3.2.1 Cartographie

- **A l'écart des lignes**

Les mesures de CE effectuées en extérieur dans les exploitations à l'écart de ligne HT ou THT ont donné des valeurs de CE variant entre 0 et 14,5 V/m (sur un site un CE de 144 V/m a été mesuré mais la présence de caténares a été signalée dans le rapport). Les valeurs de CM en extérieur dans les exploitations à l'écart de ligne HT ou THT oscillaient entre 0 et 0,19 μ T.

- **Sous les lignes**

Le Tableau 3 présente les résultats globaux des différents enregistrements (cartographie) effectués dans les exploitations près des lignes de transport d'électricité.

Les incertitudes de mesures élargies sur les CM et CE sont respectivement de 10,9 % et 17,1 %. Ces incertitudes ont été calculées pour la fréquence de 50 Hz et un intervalle de température allant de 10°C à 35°C.

Par ailleurs, dans les cas des exploitations entourées de plusieurs lignes de transport d'électricité, les mesures étaient effectuées sous la ligne la plus proche de la ferme (la valeur indiquée sur la seconde ligne pour certains sites, dans le Tableau 3, correspondant aux lignes supplémentaires plus éloignées des bâtiments).

Enfin, comme attendu, il y a une forte variabilité des mesures de CE sous les lignes THT/HT. Ces mesures dépendent fortement des conditions de mesures environnantes et notamment de l'humidité relative qui varie fortement entre le début de la journée où les mesures débutent et le reste de la journée (AFNOR 2014), ce qui se traduit par des variations importantes du CE au cours de la journée, comme le reflète le Tableau 3, avec des valeurs pouvant atteindre près de 8 000 V/m (mesure effectuée tôt le matin) pour des lignes de 225 kV. Pour rappel, dans des conditions normales d'humidité, le CE sous une ligne de 225 kV est typiquement de 3 000 V/m (voir précautions à prendre pour les mesures de CE en Annexe 2).

- ✓ En extérieur : Les mesures effectuées en extérieur sous les lignes HT ou THT donnent des valeurs maximales de CE comprises entre 46 V/m et 8 087 V/m (valeur « maximale » à considérer avec beaucoup de précaution en raison de l'humidité matinale). Le CM maximum mesuré en extérieur varie de 0,01 μ T à 7,59 μ T¹¹. Sur une même exploitation, une dizaine de points de mesure ont été effectués, la valeur maximale observée correspondant souvent au point situé exactement sous la ligne, tel qu'identifié par GPS sur les photos de l'exploitation. Plusieurs relevés ont été réalisés au cours de la même journée afin de tenir compte des variations de charge de la ligne. Sur certains sites, il a en effet été noté des variations entre les mesures à différents moments de la journée. Pour certaines exploitations de vaches laitières, des pâturages pouvaient se trouver exactement sous la ligne.

¹¹ Rappel : les valeurs théoriques sous une ligne HT de 225 kV sont de 3 000 V/m pour le CE et de 20 μ T pour le CM. Sous une ligne THT de 400 kV le CE théorique est de 5 000 V/m et le CM de 30 μ T.

Tableau 3 : Valeurs des champs électrique et magnétique 50 Hz mesurés dans les exploitations près des lignes de transport d'électricité.

Les incertitudes élargies sont respectivement de 10,9 % et 17,1 % pour les CM et CE (Tableau 9 et Tableau 10, Annexe 4).

Site #	Type de ligne(s) (kV)	Distance ferme*/ligne (m)	Sous la ligne **		Dans les bâtiments ***	
			CE max (V/m)	CM max à 50 Hz (μT)	CE min/max (V/m)	CM min/max à 50 Hz (μT)
10	400/400	24	1 119 à 6 885 ^a	7,59	0,11 à 1,06	0,33 à 2,97
	225/90	93	344 à 2 939 ^a	1,65		
24	400/400	116	4 227 à 6 309 ^a	3,75	0,01 à 1,41	0,09 à 0,11
	225/63	170	1 083 à 1 612 ^a	1,75		
25	400/400	46	4 827 à 5 060	3,94	0,01 à 20,55	0,18 à 0,56
	225	17	1 590 à 1 692	2,13		
14	400/400/63	0	2 562 à 2 814	2,78	0,29 à 6,78	0,02 à 2,01
17	400/400	215	1 230 à 3 262 ^a	1,87	0,02 à 0,05	0,04 à 0,06
9	400/400	136	2 107 à 2 275	2,45	0,04 à 3,09	0,03 à 0,09
27	400/400	25	2 868 à 3 743	3,21	0,28 à 11,03	0,15 à 0,55
19	400/400	77	574 à 1 978	3,46	0,01 à 0,36	0,13 à 0,22
22	400/400	36	2 249 à 2 587	3,96	0,54 à 2,30	0,24 à 1,06
6	225	14	846	1,13	0,07 à 5,94	0,05 à 0,53
	225	47	ND			
26	225	12	2 528 à 8 087 ^a	3,7	0,06 à 2,17	0,05 à 1,17
	225	146	ND			
8	225	100	1 485 à 1 886	3,17	0,19 à 0,65	0,02 à 0,03
3	225	105	46	0,31	0,39 à 1,10	0 à 0,01
20	225	22	2 398 à 2 648	3,82	0,02 à 43,40	0,09 à 0,76
18	90	191	320 à 404	0,47	0,31 à 1,39	0,01
	400/400	280	664 à 764			
1	90	130	247	0,09	0,14 à 1,15	0 à 0,07
30	63	46	178 à 185	0,01	0,07 à 0,51	0
	63	ND	ND			

* Distance minimale de la ligne par rapport au premier bâtiment hébergeant des animaux.

** Mesures effectuées en extérieur exactement sous la ligne (aplomb) la plus proche du site, mais pas dans les bâtiments d'élevage.

*** Mesures effectuées dans les bâtiments d'élevage à un endroit où les animaux sont présents.

^a Valeurs de mesures à considérer avec beaucoup de précaution en raison de l'humidité matinale, voir page suivante.

- ✓ Dans les bâtiments : Pour les mesures dans les bâtiments, des photos identifiant les points de mesure permettent de localiser les zones dans lesquelles des animaux sont présents (milieu du bâtiment volailles, cases des porcs ou couloirs entre les cases, stabulation, etc.) ou des points de passages fréquents (zone de traite par exemple). Le Tableau 3 présente pour chaque site, les valeurs de CE et de CM minimales et maximales mesurées en ces points. La distance minimale entre le bâtiment et la ligne HT/THT est également indiquée. Ces valeurs de champs varient entre 0,01 et 43 V/m pour le CE et entre 0 et 2,97 μ T pour le CM.

Comme attendu, le CE est rapidement écranté et les valeurs diminuent rapidement à l'intérieur des bâtiments, y compris dans le cas des bâtiments situés exactement sous la ligne. Par exemple, sous la ligne 400 kV (Tableau 3, ligne 4, site n°14) le CE max en extérieur est de 2 814 V/m, alors que celui mesuré dans le bâtiment d'engraissement, situé exactement sous la ligne, est de 6,78 V/m.

De la même manière, le CM diminue à mesure que la distance par rapport à la source augmente. La valeur maximale de CM mesurée dans les bâtiments de volailles pour l'exploitation représentée ligne 1 (site n°10) du Tableau 3, passe de 7,6 μ T sous les lignes (400/400 + 225 + 90 kV) à 2,9 μ T dans la « cellule 2 » située à 24 m des lignes.

RTE a été sollicité pour obtenir les valeurs des transits dans les lignes de transport électriques correspondant aux moments où les mesures ont été effectuées. Le

Tableau 4 présente ces valeurs de transits qui indiquent, pour la plupart des mesures, une bonne cohérence entre les valeurs des CM mesurés pour les différents sites et aux différentes heures de la journée, avec les valeurs des courants traversant les lignes.

Toutefois pour les premiers relevés de CE, effectués le matin, sur les sites 10, 24, 17 et 26 (résultats identifiés avec un * dans le tableau 4), les valeurs des mesures sont à considérer avec beaucoup de précaution. En effet, ces mesures anormalement élevées (c'est-à-dire nettement supérieures aux valeurs de CE attendues sous ces ouvrages, cf. note de bas de page 11 page 33) ont été relevées en début de matinée, et l'influence du niveau d'humidité relative sur la mesure des CE est bien connu (cf. Annexe 2). Ces valeurs peuvent être expliquées par la condensation pouvant être déposée sur le trépied isolant de la sonde et/ou par le fait que la rosée du matin n'est pas encore totalement évaporée de la végétation voisine. Bien que le laboratoire Exem ait travaillé selon les recommandations listées dans l'annexe 2, dans les limites des contraintes environnementales notamment concernant la végétation et l'humidité (éloignement de l'opérateur, pas de pluie, trépied en bois avec une permittivité proche de celle de l'air, etc.), ces valeurs n'ont pas été reprises dans le texte et n'ont été conservées que dans les tableaux de résultats des mesures.

Tableau 4 : Valeurs des transits (A) relevés dans les lignes au moment des mesures (source RTE), CM et CE mesurés sous les lignes à différents moment de la journée.

Les incertitudes élargies sont respectivement de 10,9 % et 17,1 % pour les CM et CE (Tableau 9 et Tableau 10, Annexe 4).

Site #	Type de ligne(s) (kV)	Heure(s) des mesures	Transit (A)	CM mesuré (μT)	CE mesuré (V/m)
10	400/400	08:30	1 100/1 280	7,30	6 885*
		11:49	1 120/1 360	7,56	2 862
		14:15	1 160/1 360	7,59	1 119
	225/90	08:41	55/60	1,65	2 939*
		12:11	145/75	1,57	1 130
		14:26	100/60	1,65	344
24	400/400/225/63 (point 1)	09:18	253/253/150/50	2,08	6 309*
		12:15	330/330/230/50	2,96	4 822
		15:06	385/385/270/47	2,98	4 277
	225/400/400/63 (point 2)	09:28	165/270/270/44	1,08	1 612*
		12:26	240/340/340/52	1,56	1 233
		15:16	265/380/380/45	1,75	1 083
25	400/400/225 (point 1)	10:03	305/305/160	3,03	4 827
		14:01	380/380/260	3,94	5 060
		16:18	305/305/195	3,14	5 026
	225/400/400 (point 2)	10:12	170/310/310	1,34	1 590
		13:55	250/375/375	2,13	1 692
		16:12	200/305/305	1,64	1 687
14	400/400/63	12:01	440/440/33	2,78	2 652
		14:49	340/340/32	2,29	2 562
		15:54	280/280/32	2,06	2 814
17	400/400	09:55	600/300	1,87	3 262*
		13:48	590/350	1,86	1 230
		14:56	580/340	1,78	1 960
9	400/400	08:59	450/630	2,44	2 274
		14:10	470/630	2,45	2 107
27	400/400	10:05	360/0	2,92	2 868
		12:52	360/0	3,21	3 743
		16:48	300/0	2,51	3 608
19	400/400	09:27	920/0	3,25	1 883
		11:43	950/0	3,46	1 978
		16:08	740/0	2,53	1 969
22	400/400	09:27	670/670	3,75	2 334
		12:17	705/705	3,96	2 556
		15:10	680/680	3,88	2 587
6	225/225	14:18	145/93	1,13	846
26	225/225	08:57	240/205	3,57	8 087*
		12:22	260/220	3,70	2 667
		15:55	225/200	3,35	2 528

Site #	Type de ligne(s) (kV)	Heure(s) des mesures	Transit (A)	CM mesuré (μ T)	CE mesuré (V/m)
8	225	08:48	265	1,84	1 485
		12:22	315	2,70	1 824
		15:48	335	3,17	1 886
3	225	16:55	100	0,31	46,3
20	225	11:01	135	2,87	2 398
		13:48	150	3,82	2 590
		15:39	130	3,35	2 648
18	90	09:44	63	0,31	404
		13:12	55	0,34	320
		14:24	50	0,31	355
	400/400	09:27	610/280	0,45	764
		13:29	610/330	0,47	694
		14:43	610/300	0,46	664
1	90	11:52	60	0,09	248
30	63/63	09:33	0/100	0,01	185
		12:18	0/130	0,01	183
		17:06	0/95	0,01	178

*Valeurs de mesures à considérer avec beaucoup de précaution en raison de l'humidité matinale.

3.3.2.2 Mesures à proximité des appareils

Des mesures ont été effectuées à proximité d'équipements préalablement identifiés par les experts du GT en fonction des caractéristiques des élevages. Ces mesures ont été réalisées au plus près de l'équipement (environ 30 cm) en cherchant la hauteur à laquelle la valeur maximale était observée. Une fois le maximum trouvé, la hauteur et l'éloignement par rapport à l'équipement étaient indiquées.

Le Tableau 5 présente un résumé des résultats de ces mesures, les appareils ayant été regroupés par « catégorie » de façon à en faciliter la lecture. Les résultats complets avec indication des hauteurs et des distances de mesure ainsi que la décroissance des champs sont présentés en Annexe 3.

Tableau 5 : Champ magnétique émis par différents équipements présents dans les fermes d'élevage. Les champs maximums sont mesurés à une distance de 30 cm.

Les incertitudes élargies sont de 18 % pour les CM (Tableau 11, Annexe 4).

Nature de l'équipement	CM (large bande) mesurés (μ T)	Nbre d'appareils mesurés
Armoire de commande	0,05 à 2,63	17
Armoire électrique	0,03 à 24,60	33
Ascenseur à œufs*	0,67 à 1,02	2
Broyeur pour l'alimentation	6,96	1
Chaîne d'alimentation	0,14 à 6,96	6
Centrifugeuse (traitement du lisier)	0,88 à 5,69	2

Nature de l'équipement	CM (large bande) mesurés (μ T)	Nbre d'appareils mesurés
Chaine de curage	0,11 à 0,73	3
Chauffage radiant (maternité)	0,16 à 0,69	4
Chauffe eau	0,05 à 1,05	17
Climatiseur	0,23 à 0,62	4
Compresseur	0,44 à 9,70	7
DAC	0,28 à 0,42	3
Groupe électrogène	1,85 à 3,12	2
Hacheur/mélangeur de la fosse à lisier	0,06 à 0,39	2
Lampe chauffante maternité	0,03 à 1,33	7
Eclairage - LED	0,03	2
Eclairage - Lampe basse consommation	0,18 à 2,50	2
Eclairage - Ampoule à incandescence	0,03	1
Eclairage - Néon	0,03 à 0,91	18
Lavage du tank à lait	4,09 à 11,02	2
Laveur haute pression	0,12 à 1,03	7
Machine à soupe	0,08 à 18,92	11
Mise des œufs en alvéoles*	0,37 à 0,52	3
Moteur des bandes à œufs*	2,95	1
Moteur de maintien de l'hygrométrie	6,54	1
Néon anti moustiques	0,15 à 0,36	2
Plaque chauffante au sol	0,03 à 0,85	5
Pompe à lait	1,54 à 9,17	4
Pompe à vide (traite)	0,33 à 2,28	9
Robot de traite	0,25	1
Rotaflo	0,06	1
Séchoir à fientes	0,06 à 0,63	2
Surpresseur	0,17 à 3,62	3
Table de tri (œufs)*	1,19	1
Tank à lait - brasseur	0,05 à 0,97	7
Tank à lait - refroidisseur	0,13 à 2,22	7
Tapis à œufs*	0,29 à 1,00	2
Variateur de fréquence	0,20 à 2,63	3
Ventilateur extracteur	0,04 à 1,34	9
Ventilateur brasseur d'air	0,35 à 7,67	3
Vis d'alimentation (chaine)	0,04 à 10,91	15
Vis d'alimentation (pastille)	0,57 à 0,82	2
Vis de retournement des œufs*	1,64	1

*Equipements identifiés comme étant à proximité des œufs (en élevage ou au couvoir).

** Lignes grisées : équipements proches des animaux

La majorité des mesures a été effectuée à une distance de 30 cm, la hauteur variant entre 30 cm (vis d'alimentation, chauffage au sol, etc.) et 1,92 m (tank à lait, néons, etc.). Un certain nombre d'équipements auprès desquels les mesures ont été réalisées ne sont pas proches des animaux, ceux identifiés comme proches des animaux ou des œufs (dans le cas des poules pondeuses et du couvoir) sont identifiés sur les lignes grisées.

Les valeurs les plus élevées mesurées à 30 cm correspondent, dans les exploitations visitées, aux appareils suivants : armoire électrique (24 μ T), machine à soupe (18,92 μ T), lavage du tank à lait (11,02 μ T), vis d'alimentation (10,91 μ T), compresseur (9,70 μ T) et pompe à lait (9,17 μ T). Cependant, tous ces appareils n'étaient pas, pour les exploitations visitées, proches des animaux. De plus, en augmentant la distance le CM décroît très rapidement : armoire électrique (24 μ T à 30 cm ; 7,09 μ T à 1 m ; 3,5 μ T à 1,5 m), machine à soupe (18,92 μ T à 30 cm ; 0,65 μ T à 1 m), lavage du tank à lait (11,02 μ T à 30 cm ; 0,25 μ T à 1 m), vis d'alimentation (10,91 μ T à 1,1 m de hauteur ; 2,49 μ T à 1,5 m ; 1,49 μ T à 1,7 m), compresseur (7,88 μ T à 30 cm ; 0,61 μ T à 1 m).

La majorité des équipements pour lesquels des mesures ont été effectuées lors de cette étude sont souvent spécifiques aux activités d'élevage et sont donc destinés à un usage strictement professionnel. Cependant, les valeurs de CM mesurées restent dans la fourchette des valeurs des CM produits par des appareils domestiques comme le montre le Tableau 6. En effet, des valeurs de CM supérieures auraient pu être attendues compte tenu des puissances souvent plus élevées que nécessitent les appareils professionnels à travers des alimentations et moteurs plus puissants.

Tableau 6 : Champ magnétique émis par différents équipements domestiques à une distance de 30 cm (Afsset 2010).

Equipements	CM (μ T)
Grille pain	0,06 à 0,7
Lave vaisselle	0,6 à 3
Réfrigérateur	0,01 à 0,25
Foreuse	2 à 3,5
Scie	1 à 25
Séchoir	0,08 à 0,3
Lampe de chevet	2
Réveil électrique	0,5 à 1
Aspirateur (au niveau du sol)	2 à 20
Chauffage électrique par le sol	8 à 12
Tableau électrique	4 à 5
Ventilateur	0,03 à 4

3.3.2.3 Mesures en continu sur les bovins

Le protocole prévoyait d'équiper deux bovins par site avec des appareils permettant de mesurer en continu (une mesure toutes les 4 secondes) le CM auquel ces animaux étaient exposés. Pour les fermes à l'écart des lignes HT/THT, les mesures étaient généralement faites sur 8 h en journée, sur des plages horaires variables dépendantes de l'organisation des exploitations visitées (par ex. 10h/18h ; 05h/17h ; 11h/19h, etc.). Dans ces exploitations, le CM auquel les animaux étaient exposés était plutôt lié au fonctionnement des divers équipements présents (par exemple, le moment de la traite était toujours compris dans ces plages horaires).

Pour les fermes proches des lignes HT/THT les mesures étaient faites sur 24 h pour mieux appréhender les déplacements des vaches par rapport aux lignes, sur des plages horaires débutant généralement à 9 h (parfois plus tard, 11 h).

Un appareil ayant été endommagé dans les cornadis, ce sont au total 13 bovins qui ont pu être équipés.

La Figure 10 présente l'enregistrement pendant 24 h du CM dans l'environnement d'une vache équipée d'un appareil Emdex. Ce graphe montre que pour la vache n°1927 appartenant à une ferme située proche d'une ligne THT, l'exposition varie au cours de la journée en fonction des « activités » de l'animal, notamment de son parcours dans l'exploitation et des sources de champ. L'enregistrement commence à 9 h 00 avec un niveau d'exposition très faible ($< 0,1 \mu\text{T}$) correspondant au moment de la traite pour le bovin suivi. Les premiers pics correspondent à la première sortie au pâturage avec passage à proximité de la ligne THT. La seconde période à un niveau de CM inférieur à $0,2 \mu\text{T}$ (18 h 30 – 21 h 30) correspond à la distribution d'aliment dans la stabulation et la seconde traite. A partir de 21 h 30, ce bovin est sorti dans les pâturages situés sous la ligne THT.

La Figure 11 permet de rendre compte de l'exposition du bovin : plus une barre d'histogramme dans un intervalle donné est haute, plus le bovin aura été exposé longuement à cette intensité de champ. Cela permet de calculer que cette vache (n°1927 site 24) a passé environ 6,5 heures exposée à un CM compris entre 2 et $3 \mu\text{T}$; 6,3 h exposée à un CM compris entre 1 et $2 \mu\text{T}$ et plus de 7 heures à un CM inférieur à $0,2 \mu\text{T}$.

Les Figure 12 et Figure 13 présentent les mesures effectuées sur une autre vache (n° 829, site 16) appartenant à un élevage situé à l'écart des lignes HT ou THT, et montrent que cet animal a été exposé pendant 24 h à un CM inférieur à $0,1 \mu\text{T}$, avec quelques pics supérieurs à $0,1 \mu\text{T}$, probablement dûs aux passages plus près d'équipements émettant des CM.

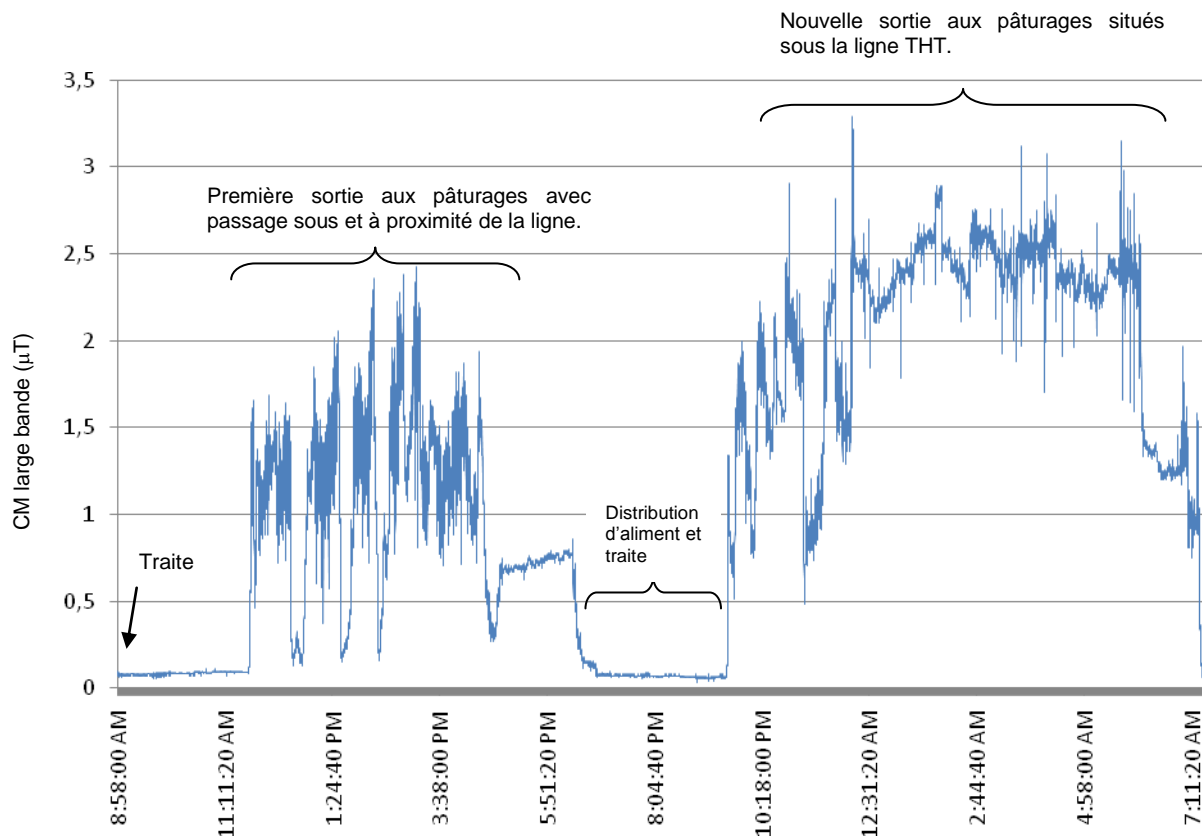


Figure 10 : Enregistrement pendant 24 h du CM dans l'environnement d'une vache laitière (n° 1927, site 24) sur une exploitation proche des lignes THT (2x400 kV, bâtiments à 77 m).

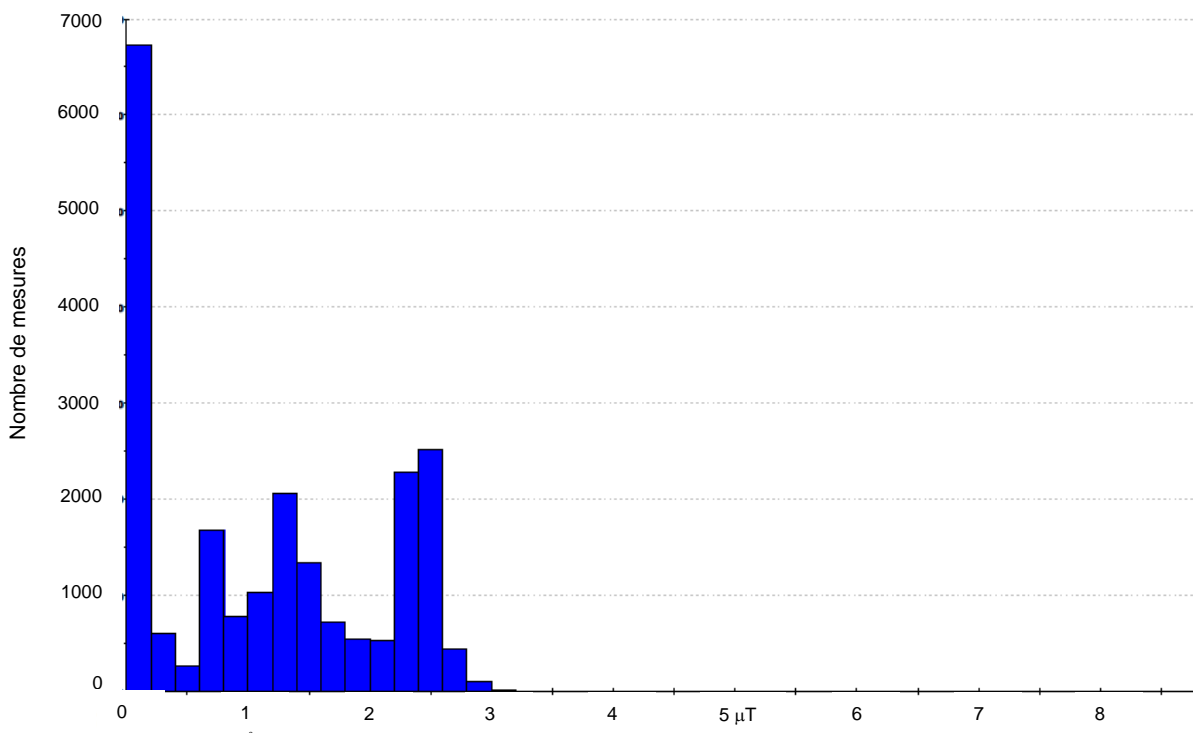


Figure 11 : Histogramme des valeurs d'intensité de CM mesurées sur la vache n° 1927 site 24 (ligne 2x400 kV, bâtiments à 77 m, 1 mesure toutes les 4 sec pendant 24 h).

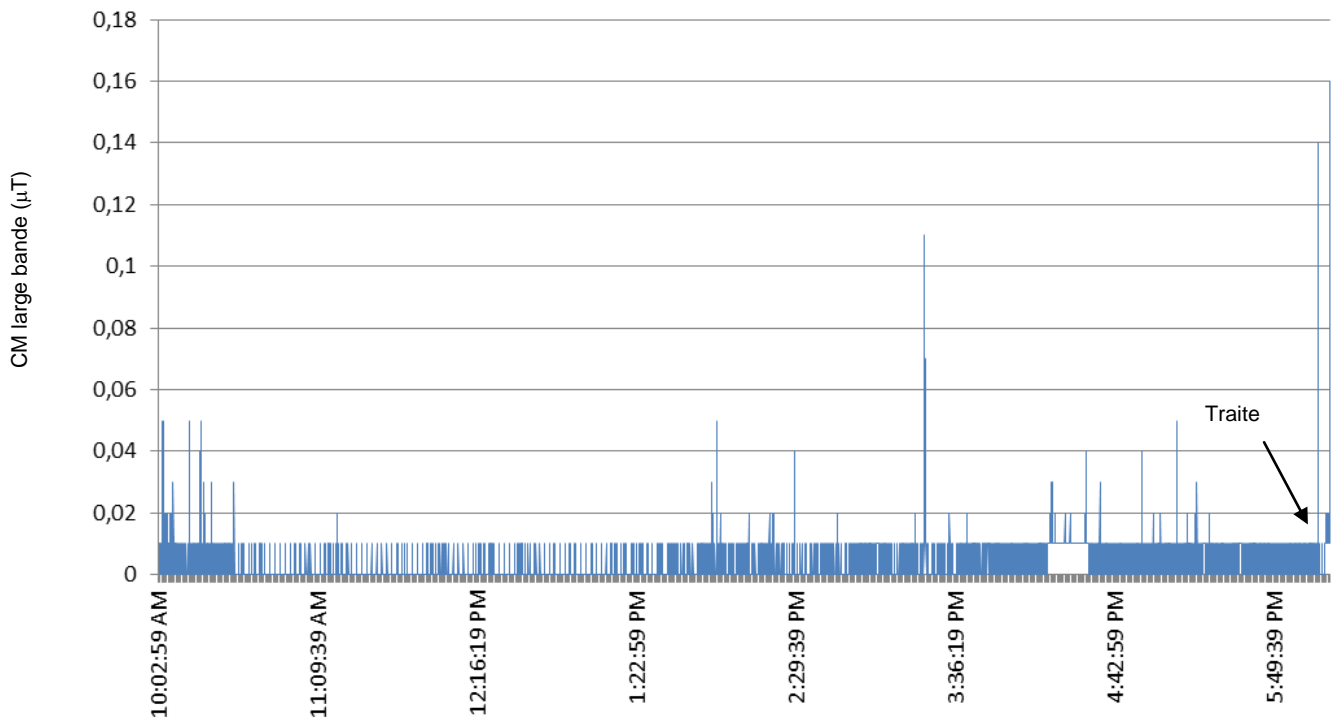


Figure 12 : Enregistrement pendant 8 h du CM dans l'environnement d'une vache laitière (n° 829, site 16) sur une exploitation à l'écart des lignes HT/THT.

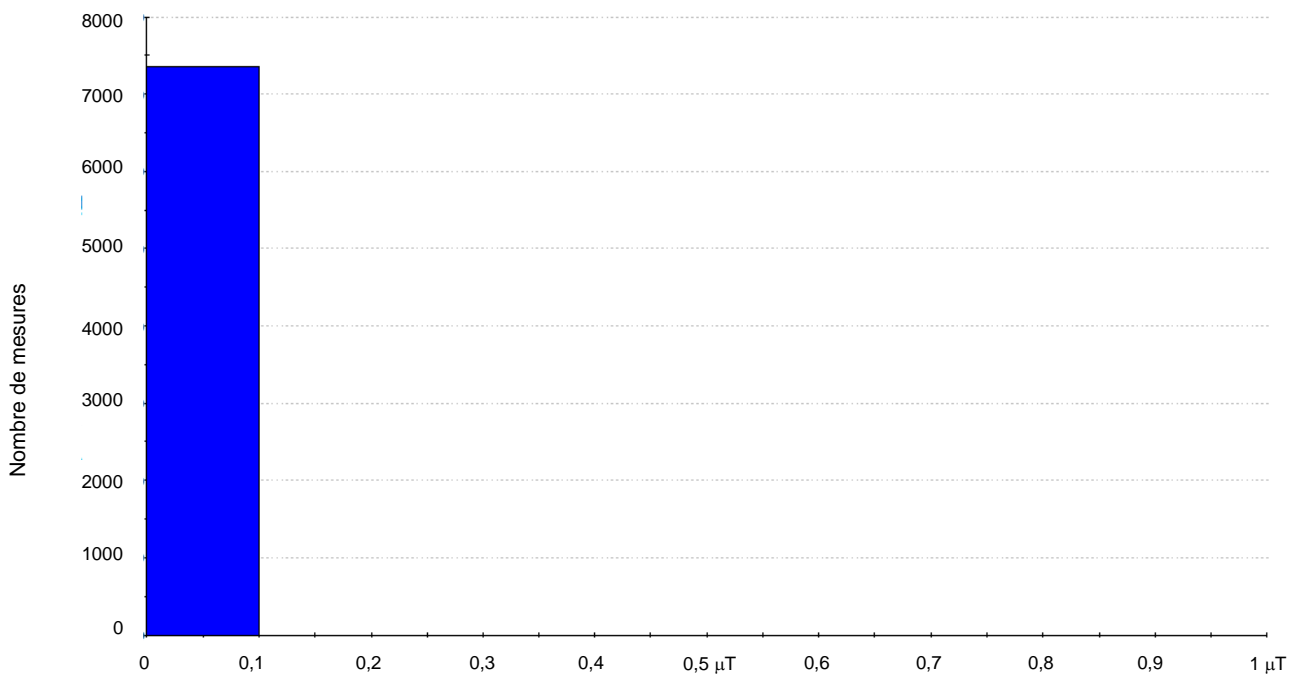


Figure 13 : Histogramme des valeurs d'intensité de CM mesurées sur la vache n° 829 site 16 (1 mesure toute les 4 sec pendant 8 h). La plupart des valeurs mesurées sont inférieures à 0,1 µT.

Dans cette étude, au total, 5 bovins ont été équipés sur trois sites situés à l'écart des lignes HT/THT (site 15, 16 et 29) et les enregistrements montrent une exposition globale qui ne dépasse pas 0,1 μT avec de rares pics pouvant monter jusqu'à 0,16 μT . Huit vaches ont été équipées sur 7 sites proches de lignes HT et THT (site 1, 8, 19, 20, 22, 24 et 25). Les enregistrements montrent que les niveaux d'exposition aux CM sous les lignes de transport d'électricité n'excèdent pas 3,5 μT .

Le Tableau 7 présente une synthèse des résultats des mesures en continu effectuées sur les bovins équipés d'un appareil Emdex.

Tableau 7 : Résultats des mesures en continu sur bovins équipés d'un enregistreur, sur une durée de 24 h pour les exploitations proches des lignes HT/THT et de 8 h pour les exploitations à l'écart de lignes HT/THT.

N° site	Caractéristiques du site		Valeur max de CM (μT) enregistrée sur l'animal	Durée d'exposition aux plages de valeurs de CM (μT) enregistrées			Plage de valeurs de CM (μT) auquel l'animal a été exposé le plus longtemps
	Type de ligne (kV)	Distance ferme/ligne (m)		[0 - 1] μT	[1 - 2] μT	[2 - 3] μT	
Sites proches de lignes HT/THT*							
24	400/400/	116	3	11 h	6 h et 10 min	6 h et 30 min	0 - 0,42 7 h et 25 min
	225/63	170					
25	400/400/	46	2,42	22 h et 20 min	30 min		0 - 0,42 15 h
	225	17					
19	400/400	77	2,2	21 h et 35 min	2 h	11 min	0 - 0,42 20 h
			2,42	21 h et 30 min	2 h	30 min	0 - 0,42 20 h
22	400/400	36	1,38	22 h et 25 min	1 h et 25 min		0 - 0,42 20 h et 50 min
8	225	100	0,21	24 h			0 - 0,21 24 h
20	225	22	0,8	23 h et 40 min			0 - 0,21 23 h
1	90	130	0,21	8 h			0 - 0,21 8 h
Sites à l'écart de lignes HT/THT**							
15			0,1	8 h			0 - 0,1 8 h
			0,1	8 h			0 - 0,1 8 h
16			0,1	8 h et 10 min			0 - 0,1 8 h
			0,1	8 h et 20 min			0 - 0,1 8 h
29			0,42	9 h			0 - 0,42 9 h

* Enregistrements effectués sur un nyctémère.

** Enregistrements effectués sur une durée de 8 h.

En conclusion, cette étude de caractérisation de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM-EBF montre qu'il est possible d'identifier les principales sources d'exposition aux CEM, d'en mesurer les niveaux ainsi que leur variation en fonction des activités des animaux au cours de la journée. Les CM mesurés sous les lignes de transport d'électricité à HT ou THT restent de faible intensité (entre 0,01 et 7,59 μT) et les CE sont compris entre 46 et 5 060 V/m. Ces champs sont de plus faible intensité dans les bâtiments d'élevage (< 3 μT et 43 V/m). Les sources internes aux élevages peuvent générer des CM qui atteignent 25 μT à proximité de certains équipements (notamment les armoires électriques), mais en général les animaux n'y sont pas directement exposés et ces champs sont comparables à ceux mesurés auprès d'équipements domestiques ou de bricolage courants. Pour mémoire, 100 μT est la valeur limite d'exposition recommandée pour le public pour des CM de 0 Hz à 300 Hz (Conseil de l'Union Européenne 1999). Ce type d'étude d'évaluation de l'exposition aux CEM-EBF pourrait être reproduit à plus grande échelle afin de mieux quantifier cette exposition dans le cadre d'études épidémiologiques ou de façon plus ponctuelle sur les sites suivis par le GPSE.

4 Effets biologiques des champs électromagnétiques sur le comportement, la santé animale et les performances zootechniques – synthèse de l'expertise internationale

La recherche bibliographique a été initiée par la coordination de l'Anses, suivant les méthodes habituelles de recherche systématique, et selon la procédure Anses/PR1/4/01-01 (version a) – Profil de recherche bibliographique, en ciblant les seuls éléments directement liés au thème ainsi que des revues systématiques, des méta-analyses, des études contrôlées randomisées ou postérieures à ces revues, des rapports et analyses.

La base de données Scopus a été interrogée en début de traitement de la saisine.

Les sites Internet suivants ont également été explorés : Medline, emf-portal.de, Santé Canada (<http://www.hc-sc.gc.ca/index-fra.php>) National Institute of Environmental Health Sciences & National Institutes of Health, Health Protection Agency (http://www.health.qld.gov.au/psg/pathways/webpages/pathways_home.as).

Suite à cette première recherche, 369 références ont été transmises aux experts via un extranet spécialement dédié au groupe de travail. La base de données bibliographique a ensuite été enrichie par les experts en fonction de l'étude des premiers documents. Une veille documentaire sur le sujet a été mise en place à l'Anses et les articles se rapportant au sujet ont été transférés aux experts pour leur évaluation. Un certain nombre de publications n'ont pas été retenues dans l'analyse, si elles ne donnaient pas assez d'informations sur les caractéristiques des champs électromagnétiques induits expérimentalement (impossibilité de remplir les tableaux de synthèse), si le paradigme expérimental ou les procédures de mesures ne mettaient pas l'accent sur l'impact des champs électromagnétiques ou montraient des défaillances méthodologiques pouvant biaiser les conclusions. Les publications utilisant des valeurs de CM trop importantes (> mT) n'ont pas été retenues sauf pour les animaux de rente où le nombre de publications était réduit (par rapport aux animaux de laboratoire).

4.1 Aspects neurophysiologiques et comportement

4.1.1 Magnétosensibilité, orientation et reconnaissance spatiale

La sensibilité aux CM est bien connue chez les vertébrés et invertébrés, comme support de l'orientation dans l'espace et du retour sur un lieu connu (« homing »). Les espèces migratrices se déplacent selon le rythme saisonnier pour combler leurs besoins de ressources, en suivant le CMT (oiseaux, tortues, cétacés, chauves-souris, papillons, anguilles,...).

Un sens de compas magnétique est connu d'assez longue date chez les oiseaux migrateurs (Liedvogel *et al.* 2007; Liedvogel et Mouritsen 2010; Wiltschko et Wiltschko 1995; Wiltschko *et al.* 2011) ainsi que chez les insectes et les amphibiens (Gegear *et al.* 2008; Hastings *et al.* 2014; Liedvogel et Mouritsen 2010; Maeda *et al.* 2012; Ono *et al.* 2013; Phillips *et al.* 2010).

Deux grands mécanismes co-existent et se complètent : la bio-accumulation de magnétite et l'activation de paires radicalaires chez les cryptochromes, flavoprotéines qui sont par ailleurs, pour la plupart, photo-sensibles.

- La bio-magnétite Fe_3O_4 s'accumule dans certaines cellules et se déforme de façon directionnelle dans un CM, les effets biologiques sont liés à la transduction du CM et le

signal est relayé par le cytosquelette déclenchant l'augmentation du calcium intra-cellulaire et l'influx nerveux (étudié chez l'abeille par Hsu (Hsu *et al.* 2007), qui propose la généralisation à d'autres espèces).

- Les cryptochromes sont des protéines photosensibles, capables de former des paires de radicaux qui permettent également la magnétoréception. Leurs caractéristiques moléculaires intrinsèques font que photosensibilité et magnétosensibilité sont intimement liées. Chez les espèces migratrices, il a été montré un rôle des cryptochromes non seulement dans l'orientation directionnelle selon l'inclinaison du CMT (Liedvogel et Mouritsen 2010; Ritz *et al.* 2000; Schulten *et al.* 1978; Thalau *et al.* 2006; Wiltschko *et al.* 2006), mais aussi dans l'apprentissage et la reconnaissance spatiale (pour le rôle des cryptochromes dans la régulation des rythmes biologiques, voir le paragraphe 4.3.1.2)

Ces deux mécanismes peuvent interagir chez l'animal. En 2010, Wiltschko passe en revue les études sur la navigation chez les oiseaux migrateurs et pigeons et montre qu'un sens inné de magnétoréception est utilisé essentiellement par les juvéniles inexpérimentés, alors que les adultes combinent repères magnétiques et visuels pour retrouver leur lieu de destination (Wiltschko *et al.* 2010). Selon des résultats expérimentaux antérieurs (Wiltschko *et al.* 2007), il est probable que la magnétoréception des récepteurs contenant de la magnétite situés sur le bec, soit le mécanisme ancestral qui perdure pour la réponse directionnelle innée chez les oiseaux, et que la magnéto-réception des cryptochromes rétiniens, associée à la photoréception, soit mobilisée pour l'apprentissage combiné des repères magnétiques et visuels. Il est possible que ces mécanismes aient été conservés chez les espèces d'oiseaux non migratrices, comme celles qui sont domestiquées (exemple chez *Gallus gallus*, (Wiltschko *et al.* 2007)).

Une complexité similaire des mécanismes de navigation couplés aux rythmes biologiques est décrite chez l'Abeille, qui possède également les récepteurs contenant de la magnétite (Hsu *et al.* 2007) et des cryptochromes (Rubin *et al.* 2006).

Chez les mammifères, la magnétosensibilité a été démontrée chez les cétacés (Kirschvink *et al.* 1986; Walker *et al.* 1992), les chauves-souris (Holland *et al.* 2006; Wang *et al.* 2007), les ruminants (Begall *et al.* 2008) et les carnivores (Červený *et al.* 2011), mais les mécanismes en sont encore largement méconnus. Seule la magnétosensibilité des rongeurs est plus précisément documentée (Burda *et al.* 1990; Deutschlander *et al.* 2003; Kimchi et Terkel 2001; Marhold *et al.* 1997; Muhelm *et al.* 2006).

L'alignement magnétique, comme simple réponse directionnelle par rapport au CMT, a été peu étudiée au cours des dernières décennies et reste encore en question. La revue de Begall rapporte ce phénomène chez des espèces d'herbivores (vache, cerf, cheval), avec une orientation du corps parallèle ou perpendiculaire à l'axe magnétique terrestre nord-sud. Ce phénomène apparaît néanmoins transitoire, car il peut être supprimé ou masqué par d'autres facteurs (soleil, vent, inclinaison, etc.) ou des mouvements focalisés vers une cible spécifique, et il n'est pas nécessairement exprimé par tous les individus (Begall *et al.* 2013).

Au vu des mécanismes de magnéto-sensibilité et de leur lien avec les mécanismes d'apprentissage spatial, les CM d'origine anthropique sont susceptibles de modifier le repérage spatial des animaux, mais une seule étude l'évoque pour l'instant explicitement (Engels *et al.* 2014).

4.1.2 Effets des courants électriques parasites sur le comportement des animaux de rente

La question de l'effet des courants électriques sur les animaux d'élevage a fait l'objet, au début des années 90, d'une mise au point reposant sur les études de laboratoire et de terrain disponibles à l'époque, elle n'a pas été remise en cause depuis (Brugère 2010).

L'effet des courants électriques parasites sur le comportement a été plus particulièrement étudié dans le cas des courants induits par des équipements électriques et du matériel agricole, avec un raccordement électrique défectueux à la terre, favorisant des tensions de pas ou des tensions de contact (Figure 14), la migration des charges électriques vers le sol se réalisant *via* le corps de l'animal (Brugère 2002; Rigalma *et al.* 2009). Les courants parasites ont principalement deux origines : une origine liée à l'activité de l'élevage (équipements électriques présents) et une origine externe imputable aux lignes de transport d'électricité proches de l'exploitation.

Deux types de trajet du courant traversant l'animal ont été pris en compte (Figure 14) :

1. les "tensions de contact" apparaissent au contact d'un élément métallique (abreuvoir, griffe de traite ...). Le courant traverse alors l'animal et retourne au sol par les membres.
2. les "tensions de pas" surviennent lorsqu'un courant s'établit entre les membres antérieurs et postérieurs d'un animal.

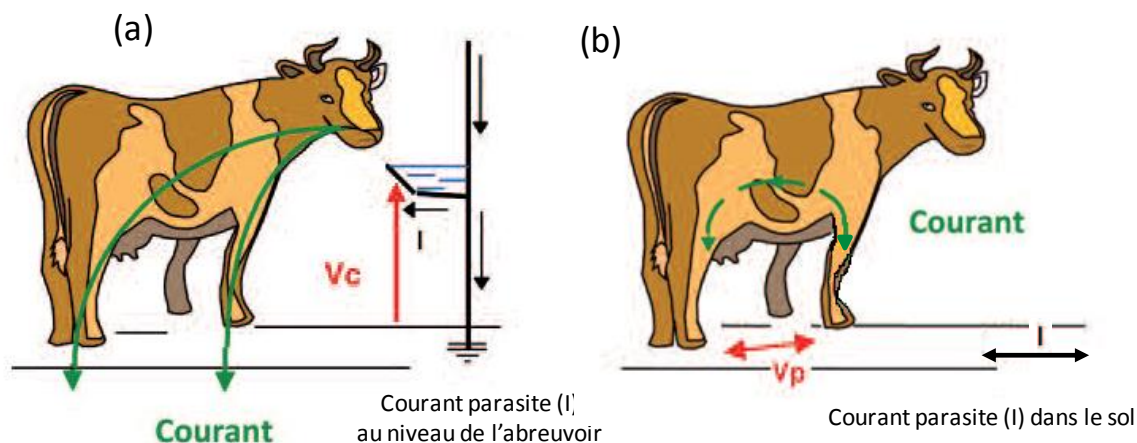


Figure 14 : Trajets du courant traversant l'animal (en vert): (a) Tension de contact (V_c) et (b) Tension de pas (V_p). I = courant parasite (d'après (Rigalma *et al.* 2009).

Le bilan des travaux, illustré dans le Tableau 12, Annexe 5, décrit une variabilité dans les réponses, allant de l'absence d'effet à des effets modérés ou sévères en fonction des conditions d'exposition et du trajet emprunté par le courant. De manière générale, la difficulté réside dans le choix des critères comportementaux caractéristiques du seuil de réponse des animaux aux courants parasites.

4.1.2.1 Chez les bovins

La synthèse bibliographique effectuée par Erdreich *et al.* en 2009 montre qu'aucune modification du comportement de l'animal n'est enregistrée tant que l'intensité du courant auquel est exposé l'animal reste inférieure à 2 mA (Erdreich *et al.* 2009). La majorité des vaches expriment des réponses comportementales, telles que le piétinement, le coup de pied, le sursaut, pour des niveaux d'intensité de courant compris entre 2 et 8 mA (Tableau 8, (Erdreich *et al.* 2009)). D'autres études, postérieures à celles prises en compte dans l'analyse de Erdreich *et al.*, ont bien confirmé un seuil de réponse comportementale compris dans cette fourchette de valeurs : 3,6 mA dans l'étude de Rigalma *et al.* (Rigalma *et al.* 2010) et 7,2 mA dans celle de Reinemann *et al.* (Reinemann *et al.* 2003). En l'état actuel des connaissances, rien ne permet d'établir une relation nette entre le seuil de perception, mesuré par la réponse comportementale, et le trajet parcouru par le courant. Pour un même trajet emprunté par le courant, les réponses comportementales peuvent être très variées, du simple lever de pied au sursaut, à la crispation voire jusqu'au cabrement et au coup de pied de l'animal illustrant ainsi la très forte variabilité individuelle dans la perception du courant et dans la réponse de l'animal (Lefcourt *et al.* 1986). Concernant l'influence du type de trajet traversant l'animal, une seule étude comparant deux types de trajet, mufle – sabots arrière *versus* membres antérieurs – membres postérieurs, a mis en évidence une activité motrice plus importante de l'animal lorsque le courant est appliqué au niveau de l'abreuvoir (Reinemann *et al.* 2003). La variabilité du seuil de réaction pourrait aussi s'expliquer par des états physiologiques différents comme le rang de lactation, ainsi que l'ont montré Aneshansley *et al.* Ces auteurs ont ainsi rapporté que les primipares commençaient à réagir pour un courant d'une intensité de 5 mA alors qu'il fallait un niveau d'intensité de 8 mA pour faire réagir les multipares (Aneshansley *et al.* 1992). Le seuil de sensibilité serait donc différent entre les deux catégories d'animaux, imputable sans doute à une différence de résistance corporelle. Apparemment, cet aspect n'a jamais été envisagé dans les autres études.

Peu de travaux se sont intéressés à des niveaux d'intensité de courant supérieurs à 8 mA, pouvant conduire à une réponse d'aversion qui peut se traduire par une diminution, voire un arrêt complet, de l'ingestion alimentaire et de la consommation d'eau. Les résultats obtenus restent contradictoires. Gorewit *et al.* (Gorewit *et al.* 1989; Gorewit *et al.* 1985), Rigalma *et al.* (Rigalma *et al.* 2010) et Aneshansley *et al.* (Aneshansley *et al.* 1992) n'ont observé aucune modification de l'ingestion d'eau et de matière sèche pour des niveaux d'intensité de courant de 12 et 16 mA respectivement, alors que Reinemann *et al.* enregistrent une baisse pour des niveaux d'intensité de courant appliqué de 8,7 et 10,2 mA, les consommations revenant à la normale au bout d'une semaine d'exposition (Reinemann *et al.* 2005). S'il s'agit là d'un seuil de réaction transitoire, les résultats disponibles jusqu'à ce jour ne permettent pas de déterminer, par contre, un niveau de seuil de réaction persistante à partir duquel l'activité de la vache laitière serait modifiée de manière durable.

Tableau 8 : Seuils de perception du courant électrique mesurés chez la vache laitière en fonction de l'intensité (en mA) et du trajet parcouru par le courant électrique [adapté de (Hultgren 1990)].

Trajet parcouru par le courant	Intensité (fréquence Hz)	Type de tension créée	Référence
Mamelle/sabot	7mA (50)	Contact	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
Mamelle/sabot	4mA (60)	Contact	(Henke <i>et al.</i> 1982)
Mamelle/sabot	2mA (60)	Contact	(Henke <i>et al.</i> 1982)
Mamelle/sabot	2mA (60)	Contact	(Gorewit <i>et al.</i> 1985)
Mamelle/sabot	4mA (60)	Contact	(Henke Drenkard <i>et al.</i> 1985)
Mamelle/sabot	8mA (60)	Contact	(Henke Drenkard <i>et al.</i> 1985)
Mufle/sabots	4mA (60)	Contact	(Brennan et Gustafson 1986)
Mamelle/sabot	5mA (60)	Contact	(Aneshansley <i>et al.</i> 1992)
Mamelle/sabot	8mA (60)	Contact	(Aneshansley <i>et al.</i> 1992)
Mufle/sabots	7,2mA (60)	Contact	(Reinemann <i>et al.</i> 2005)
Mufle/sabots	3,6mA (50)	Contact	(Rigalma <i>et al.</i> 2010)
Croupe/sabot	6mA (50)	Pas	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
Poitrail/sabot	4mA (50)	Pas	(Whittlestone <i>et al.</i> 1975)
Membres antérieurs - membres postérieurs	3mA (60)	Pas	(Lefcourt et Akers 1982)
Membres antérieurs - jarrets	5mA (60)	Pas	(Lefcourt et Akers 1982)
Membres antérieurs - jarrets	3,6mA (60)	Pas	(Lefcourt <i>et al.</i> 1985)
Membres antérieurs - jarrets	6mA (60)	Pas	(Lefcourt <i>et al.</i> 1985)
Région lombaire (électrodes intradermiques)	4mA (60)	Pas	(Gorewit <i>et al.</i> 1985)
Membres antérieurs - membres postérieurs	2mA (60)	Pas	(Gustafson <i>et al.</i> 1985)

4.1.2.2 Chez les porcs

Comparativement, l'impact des courants électriques parasites sur le comportement des porcs a été peu étudié et concerne des travaux relativement anciens.

La plupart des études concernent les comportements ingestifs chez le porc charcutier :

- L'étude de Gustafson décrit une réduction de la consommation d'eau des porcs avec l'application d'un voltage de 2,8 ou 3,6 V (Gustafson *et al.* 1986).
- Des travaux canadiens menés en prolongement dans un cadre expérimental contrôlé, en appliquant des tensions électriques entre les auges ou des abreuvoirs et le plancher métallique variant entre 0 et 8 V (Tableau 12, Annexe 5), montrent que les activités à la mangeoire et à l'abreuvoir peuvent être modifiées au cours de l'heure suivant la distribution d'aliment avec l'application d'un courant de 5 ou 8 V comparativement à un courant de 2 V ou le traitement contrôle 0 V (Robert *et al.* 1991 ; Robert *et al.* 1992a). Ces travaux montrent que les effets observés sont dépendants du voltage appliqué, mais aussi du niveau alimentaire des animaux et de la période considérée. Dans le cas du comportement d'abreuvement, le nombre d'épisodes d'abreuvement est réduit chez les animaux soumis à

un voltage de 8 V, ceci uniquement sur les périodes de 10 à 16 et 16 à 22 semaines d'âge (suivi des animaux de 9 à 20 semaines d'âge). Le pourcentage de temps passé à l'abreuvoir durant les heures de clarté était inférieur dans les groupes 5 V et 8 V, mais uniquement à 18 et 20 semaines d'âge. Pour la fréquence d'activité à la mangeoire pendant les heures de clarté, mesurée entre 10 et 20 semaines de vie, elle était plus élevée chez les animaux soumis à 8 V comparativement aux groupes 0 et 5 V pour les porcs restreints, alors qu'elle est similaire dans les 3 groupes de porcs nourris à volonté (Robert *et al.* 1992a; Robert *et al.* 1992b).

- l'application de voltages entre 0 et 8 V ne modifient pas sur l'ensemble de la période de croissance-finition, les quantités d'aliment et d'eau ingérées par jour que ce soit chez des animaux nourris à volonté ou restreints (Godcharles *et al.* 1993; Robert *et al.* 1992a; Robert *et al.* 1991). Néanmoins Robert *et al.* soulignent un effet dépressif d'un voltage de 5V comparativement à 0 et 2 V sur la quantité d'aliment ingérée par jour sur la phase de finition (entre 14 et 21 semaines d'âge) (Robert *et al.* 1991).

Quelques effets sur d'autres comportements sont décrits chez les porcs à l'engrais, tels qu'une augmentation de la fréquence de la posture assise et une diminution du repos chez les animaux restreints et soumis à des courants de 8 V (Robert *et al.* 1992a). Les comportements de fouille et d'exclusion de congénères à l'auge, peuvent aussi augmenter dans le cas d'un voltage passant de 5 à 8 V et de 2 à 5 V respectivement (Godcharles *et al.* 1993).

Le comportement des truies reproductrices et des porcelets n'est pas affecté par une exposition à des courants électriques parasites entre 5-8 V et 2-5 V respectivement (Robert *et al.* 1996). Pendant la gestation, les cochettes exposées sont plus souvent couchées et expriment moins de comportements stéréotypés que les animaux non exposés. Pendant la lactation, les comportements ingestifs sont similaires, à l'exception de la première semaine de lactation, au cours de laquelle la consommation alimentaire est inférieure chez les animaux témoins.

Compte tenu des résultats disponibles, il paraît difficile de conclure à un effet marqué et durable des courants parasites sur le comportement du porc à des intensités d'exposition allant jusqu'à 8 V.

4.1.2.3 Chez l'Abeille domestique (*Apis mellifera*)

L'exposition aux CEM-EBF engendre agitation et agressivité, ce qui a été attribué essentiellement aux CE à l'intérieur de la ruche (si supérieurs à 4 kV/m) et aux chocs électriques liés à la conductivité notamment de planches d'envol humides (revue dans (Lipinski 2006)). Les observations du début des années 1980 relatées dans l'article de Morse et Hooper se rapportent donc plutôt à des phénomènes d'électropathologie (Morse et Hooper 1985). Des dispositifs expérimentaux de tunnel d'envol avec contact prolongé ont permis de discriminer les effets liés aux chocs (courants induits dans des milieux conducteurs) des effets de champs électriques à l'intérieur de la ruche sur le comportement et la communication (Bindokas *et al.* 1988). Les effets de courants induits se manifestent dès 1 à 4 kV/m, c'est à dire pour des ruches situées juste en dessous de lignes THT. Des études récentes montrent que la perception des CE chez l'abeille et le bourdon a un rôle important dans l'apprentissage et la communication au sein de la ruche (Clarke *et al.* 2013; Lihoreau et Raine 2013).

4.1.2.4 Conclusion

De nombreuses études ont été menées sur les modifications comportementales des animaux de rente en réponse à des courants électriques induits. Ces derniers peuvent résulter d'un contact direct des animaux avec des structures ou des équipements sous tension (matériel d'élevage) ou avec le sol, en cas de raccordement électrique à la terre défectueux. Ces courants peuvent également être induits expérimentalement. Dans tous les cas ils favorisent des tensions de pas ou des tensions de contact, la migration des charges électriques vers le sol se réalisant *via* le corps de l'animal. Ces études concluent à des réponses de stress, modérées à sévères, qui varient selon les espèces, compte-tenu de leurs différences de résistances corporelles aux courants électriques. Des solutions existent en agissant sur l'installation électrique du bâtiment (mise à la terre, équipotentialité des masses métalliques) et en limitant les zones humides au sol.

Dans les exploitations, les courants parasites peuvent également être induits par la proximité des lignes HT/THT. Cependant, la contribution respective des équipements et des lignes HT/THT à ces courants reste encore à être évaluée.

4.1.3 Effet des champs électromagnétiques sur le comportement des animaux modèles et de rente

4.1.3.1 Essais de terrain ou en milieu semi-contrôlé

Les données disponibles restent parcellaires, et concernent dans le cas des animaux de rente principalement les ruminants, compte tenu des systèmes d'élevage développés dans ce type de production animale (Tableau 13 en annexe 5).

Concernant l'impact des lignes HT/THT sur le comportement, Ganskopp *et al.* ne rapportent aucune modification du « *pattern comportemental*¹² » (ou patron) des activités d'alimentation, d'allaitement, de déplacement, de couchage, chez des vaches et leurs veaux logés dans des bâtiments à proximité d'une ligne THT (500 kV, 55 m de distance maximum) comparativement aux animaux non exposés (Ganskopp *et al.* 1991). Une étude américaine sur 11 exploitations ovines, équinnes, porcines et bovines (578 bovins dont 434 bovins lait) faisant l'objet d'une surveillance sanitaire en raison de leur proximité de la ligne Dumont-Jefferson (765 kV ; 60 Hz ; CE généré qui a varié de 2,5 kV/m à 12 kV/m selon la distance entre la ligne et l'exploitation), ne décrit aucun effet net sur le comportement de pâturage des animaux situés sous ou près de cette ligne même si les chevaux paraissaient éviter de pâturer sous la ligne à l'inverse des bovins (Amstutz et Miller 1980). D'autres enquêtes ont confirmé que les bovins n'évitaient pas systématiquement les zones de pâturage situées sous des lignes THT, que ce soit pour une ligne d'intensité plus faible (400 kV ; 50 Hz) (Algers *et al.* 1981) ou plus forte (1 100 kV/m ; 60 Hz) (Rogers *et al.* 1982). Au cours de 5 années consécutives, l'observation de taurillons placés sous une ligne de 765 kV (60 Hz) n'a montré aucun effet lié à l'exposition à un CE estimé à 12 kV/m, sur le comportement au pâturage des animaux, qui consomment sans réticence sous la ligne (Busby *et al.* 1974). L'exposition de 774 bovins à viande (vaches allaitantes et veaux) à un CEM moyen estimé de 5.6 kV/m sous une ligne THT de 500 kV pendant 3 ans n'a pas non plus affecté la consommation alimentaire (Angell *et al.* 1990; Raleigh 1988). En revanche, Burda *et al.* montrent un alignement spontané des animaux lors des activités de pâture et de repos dans la direction nord-sud du CMT, qui disparaît sous les lignes THT et jusqu'à 150 m des pylônes (Burda *et al.* 2009).

Un essai (Stormshak *et al.* 1993) s'est intéressé aux effets d'un CEM de 6,25 kV/m et 3,77 μ T créé dans un corridor de 3 lignes de transport d'électricité (une de 500 kV et deux de 23 kV) chez des agnelles exposées pendant 300 jours. Encore une fois, aucun effet n'a été mis en évidence sur le comportement des animaux.

L'effet des CEM chez les oiseaux a été étudié plus particulièrement chez les populations sauvages vivant à proximité de lignes THT, et qui les utilisent comme sites de perchoir, de nid ou de chasse, tels que le faucon crécerelle dont l'exposition au CEM autour de ces nids a été estimée entre 70 et 91 % du temps selon l'activité considérée [parade, incubation, nourrissage ; (Fernie et Reynolds 2005)]. Chez des faucons captifs suivis sur 2 années, et soumis à un CM de 30 μ T et un CE de 10 kV/m, il a été montré un effet favorable du CEM sur le succès d'envol mais un taux d'éclosion réduit, ces données sont susceptibles d'expliquer un moindre succès reproducteur chez des animaux en conditions de liberté dont les nids se trouvent à proximité d'une ligne HT/THT (Fernie *et al.* 2000a; Fernie *et al.* 2000b; Fernie et Reynolds 2005).

¹² Pattern comportemental : Modèle spécifique représentant d'une façon schématique la structure d'un comportement individuel ou collectif, traduit par patron en français.

Chez les poissons, Basov n'indique pas une modification notable du comportement de cyprinidés (plus grande famille des poissons d'eau douce) ou de percidés dans des zones aquatiques proches ou éloignées de lignes HT/THT, mais avec néanmoins des effets rapportés sur le comportement d'orientation et de recherche alimentaire chez l'esturgeon et le poisson chat (Basov 2007).

En l'état actuel des connaissances, il est difficile de tirer des conclusions des résultats de ces essais de terrain compte tenu de :

- (i) la diversité des intensités du CEM et des durées d'exposition, valeurs qui ne sont, dans certains cas, que des estimations en l'absence de données sur le temps réel passé par les animaux à proximité du champ le plus élevé généré par les lignes, et donc du degré d'exposition effectif ;**
- (ii) de données parcellaires dans le cas des animaux de rente, en productions porcine et avicole.**

4.1.3.2 Etudes expérimentales en milieu contrôlé

Le bilan des publications montre que les caractéristiques des champs utilisés expérimentalement sont extrêmement variables selon les études, tant dans l'intensité de ces champs (25 à 60 Hz ; 7,5 μ T à 8 mT), que dans la durée et la fréquence d'exposition (15 min à 4 h pour les expositions brèves, 1 h à 24 h/jour pendant 4 jours minimum et jusqu'à 4 semaines pour les expositions plus longues, voire de manière chronique dans le cas d'une application sur la période gestation-lactation). Par ailleurs, les travaux ont été menés principalement dans un cadre expérimental et en situation instrumentale, dans des conditions extrêmement contrôlées, et ciblés sur les processus d'apprentissage et de mémorisation lors de conditionnements utilisant différents stimulus (chocs électriques, rencontre sociale), ou sur la réponse à des tests de nature anxiogène (*open-field*, piscine de Morris, labyrinthe en T ou radial, test d'émergence, test de la nage forcée, test de détour¹³).

¹³ Principe des tests comportementaux :

« **Open-field** » : mesure de la réactivité émotionnelle à un isolement social et à l'introduction dans un environnement inconnu Forkman B, Boissy A, Meunier-Salaün M-C, Canali E, Jones R (2007) A critical review of fear tests used on cattle, pigs, sheep, poultry and horses. *Physiology & Behavior* **92**(3), 340-374.

Piscine de Morris: mesure des capacités de mémorisation dans un dispositif aquatique circulaire avec une plateforme submergée dont la position doit être mémorisée par l'animal introduit dans le bassin et qui doit l'atteindre pour trouver refuge hors de l'eau. Morris R (1984) Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of Neuroscience Methods* **11**(1), 47-60.

Labyrinthe en T ou radial : mesure de l'apprentissage et de la mémoire spatiale dans un dispositif formé de branches en forme de T ou d'une plateforme centrale d'où rayonnent des branches, au bout desquelles est placée de la nourriture (toutes ou certaines branches étant récompensées), l'animal devant apprendre à mémoriser les branches récompensées. Olton DS, Samuelson RJ (1976) Remembrance of places passed: Spatial memory in rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes* **2**(2), 97-116.

Test d'émergence : mesure de la néophobie dans un dispositif où l'animal est placé seul dans une boîte obscure qui se trouve au centre d'un milieu éclairé. Holmes A (2001) Targeted gene mutation approaches to the study of anxiety-like behavior in mice. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **25**(3), 261-273., Takao K, Miyakawa T (2006) Light/dark transition test for mice. *Journal of Visualized Experiments* **1**, e104.

La synthèse de ces travaux est présentée dans le Tableau 14, en Annexe 5.

On peut distinguer les travaux menés avec des expositions à des champs d'intensité supérieure à 100 μT et des travaux conduits avec une application de CEM dont l'intensité maximum est de 100 μT , considérée comme seuil critique pour l'humain et sachant que le seuil d'exposition est de 30 μT sous des lignes HT ou THT. Les travaux concernent majoritairement des expositions d'intensité élevée, visant à accentuer les niveaux de réponses et dans tous les cas, ils ont été réalisés plutôt sur des animaux modèles. Les travaux relatifs aux effets des CEM sur le comportement des animaux de rente et en conditions contrôlées restent en revanche parcellaires.

- **Exposition à des champs électromagnétiques supérieurs à 100 μT**

L'exposition à des CEM supérieurs à 100 μT peut générer une dégradation des capacités cognitives, en phase d'apprentissage ou de mémorisation. Le degré de perturbation est très variable selon les études qui diffèrent dans leurs modalités d'exposition aux CEM, mais aussi selon la nature de la situation de mesure, spatiale, sociale ou émotionnelle.

Des déficits d'apprentissage spatial chez le rat et la souris ont été observés mais le plus souvent lors d'exposition à des champs d'intensité très élevée.

- L'intensité des effets dépend à la fois de l'intensité du champ et de la durée d'exposition, les effets des CEM pouvant être obtenus aussi bien dans des expositions courtes de forte intensité chez la souris (exposition de 4 h après apprentissage à 8 000 μT , test réalisé 24 h après la phase d'apprentissage (Foroozandeh *et al.* 2013) que des expositions plus longues et de plus faible intensité chez le rat (exposition de 4 h pendant 3 à 8 jours, à 5 000 μT (Babri *et al.* 2010)).
- Les effets peuvent être réels, mais transitoires, comme le montre Sienkiewicz *et al.* suite à une exposition de 45 min à une intensité de 750 μT avec une dégradation des performances d'apprentissage spatial limitée uniquement aux premières sessions d'acquisition de la tâche (Sienkiewicz *et al.* 1998b).
- Les déficits de mémorisation dépendent aussi de la période d'exposition. Ainsi un délai de 45 min entre l'exposition à des intensités allant de 7,5 à 750 μT et un test de mémorisation de la tâche spatiale dans un labyrinthe radial, peut aussi supprimer le déficit des performances observées si le test est réalisé juste après la fin de l'exposition aux CEM (Sienkiewicz *et al.* 1998a).

Chez les animaux de rente, une seule étude peut être citée (Che *et al.*, 2007) : des poussins âgés de 7 jours et soumis pendant 7 jours à une intensité de champ de 2 000 μT montrent des capacités d'apprentissage dans un test de détour réduites, suite à une exposition de 20 h/jour mais sans aucune modification pour une exposition de 50 min/jour.

Test de la nage forcée : l'animal expérimental (rat ou souris) est placé dans un récipient contenant de l'eau et dont il ne peut s'échapper. Après un certain temps d'activité, l'animal s'immobilise, le bout du nez hors de l'eau. La durée d'activité est très variable et sensible à l'action des antidépresseurs. Petit-Demoulière B, Chenu F, Bourin M (2005) Forced swimming test in mice: a review of antidepressant activity. *Psychopharmacology* **177**(3), 245-255.

Test de détour : l'animal doit apprendre à contourner un obstacle pour obtenir la nourriture placée derrière l'obstacle (exemple d'un déplacement le long d'un grillage dont l'extrémité libre permet d'accéder à la ressource alimentaire placée derrière le grillage). Che Y, Suna H, Cui Y, Zhou D, Ma Y (2007) Effects of exposure to 50 Hz magnetic field of 1mT on the performance of detour learning task by chicks. *Brain Research Bulletin* **74**, 178-182.

Dans un contexte de reconnaissance d'un objet familier, les effets divergent selon les études qui appliquent des conditions d'exposition très différentes. Ainsi Sienkiewicz *et al.* ne montrent pas, chez des rats, un effet d'une exposition aux CEM entre 7,5 et 750 μT sur la mémorisation, dans le cas d'une exposition aiguë et de courte durée (45 min, une fois) suggérant que l'exposition à des CEM n'affecte pas nécessairement tous les systèmes de mémorisation du cerveau, en particulier la mémoire de travail non spatiale (Sienkiewicz *et al.* 2001). En revanche, un déficit de discrimination d'un objet connu *versus* un objet non familier est décrit par Mostafa *et al.* chez le rat, dans le cas d'exposition de 24 h/j pendant 2 semaines, comparativement à une exposition pendant une semaine, ce qui souligne l'importance de la durée d'exposition (Mostafa *et al.* 2002). Dans le cas d'un test de reconnaissance sociale ¹⁴ (reconnaissance d'un congénère juvénile entre deux rencontres de 4 min séparées par un temps variable), une meilleure reconnaissance du congénère rencontré a été rapporté chez le rat adulte mâle soumis à une exposition à un CEM de 1 000 μT appliqué 2 h/j pendant 9 jours, mais l'effet est limité à la mémorisation à court terme du congénère rencontré (Vazquez-Garcia *et al.* 2004). Sur la base des mêmes conditions d'exposition et du même test de reconnaissance sociale, Reyes *et al.* suggèrent une interaction entre la facilitation de reconnaissance sociale induite par les CEM et le statut oestrogénique des rates testées, qui ont été ovariectomisées et traitées aux oestrogènes exogènes (Reyes-Guerrero *et al.* 2006).

L'effet des CEM a été aussi évalué, dans des situations de nature « anxiogène » ou « dépressive », soumettant l'animal à un isolement social, un environnement nouveau, ou des challenges sociaux. L'exposition aux CEM à des intensités extrêmes montre des réponses très variables selon les études. Ainsi Liu *et al.*, rapportent une augmentation des réponses d'anxiété chez des rats soumis à un test de type *open-field* ou labyrinthe surélevé, mais avec un effet qui varie selon le temps d'exposition, l'effet étant significatif lors d'une exposition de 2 x 4 heures par jour pendant 25 jours pour des CEM de 2 000 μT , mais cette augmentation n'est pas observée pour une exposition de 2 x 1 heure par jour (Liu *et al.* 2008). A l'extrême, une exposition à 18 000 μT pendant 2 h/jour et pendant 20 jours ne montre pas une altération dans l'activité locomotrice et le comportement en situation d'*open-field* chez des rats mâles ou femelles. L'évaluation de la réactivité émotionnelle chez des rats mâles adultes exposés à un CEM de 0,5 mT (50 Hz) pendant des périodes brèves (8 h par jour pendant 5 j) ou prolongées (24 h par jour pendant 4 à 6 semaines) a également montré une augmentation de l'immobilité chez les animaux exposés de façon chronique au CEM dans le test de nage forcée, réponses généralement interprétées comme reflétant une tendance dépressive (Szemerszky *et al.* 2010). Par contre, aucune modification comportementale n'a été observée dans le test du labyrinthe en croix surélevé qui teste les tendances anxieuses, aussi bien chez des rats exposés à court et à long terme. Chez des souris mâles exposées à un CEM de 1,5 mT, 60 Hz, 8 h par jour pendant 25 jours, Kitaoka *et al.* ont décrit l'absence d'effet sur la réactivité émotionnelle en situation d'*open-field* ou de labyrinthe en croix surélevé, mais en revanche un comportement plus « anxieux » dans le test d'émergence, et un comportement plus passif dans le test de nage forcée chez les animaux exposés (Kitaoka *et al.* 2013a).

¹⁴ **Test de reconnaissance sociale** : l'animal testé est mis en présence d'un partenaire social inconnu qu'il doit reconnaître après une séparation dont la durée est variable. Ce test vise à mesurer la capacité à apprendre les caractéristiques du partenaire rencontré, les mémoriser et reconnaître ce partenaire lors d'une nouvelle rencontre après un délai de séparation imposé. Le processus de reconnaissance est évalué par une analyse du comportement d'investigation du partenaire après sa réintroduction. Engelmann M, Wotjak CT, Landgraf R (1995) Social discrimination procedure: an alternative method to investigate juvenile recognition abilities in rats. *Physiology & behavior* **58**(2), 315-321.

Ces données montrent que, même à des intensités très élevées et dans des conditions très contrôlées, on ne peut pas conclure quant aux effets des CEM sur le comportement des animaux. Par ailleurs, l'influence des CEM varie selon la nature du test utilisé (cognitif ou anxiogène).

- **Exposition à des champs électromagnétiques inférieurs à 100 μ T**

Les effets d'une exposition à des CEM pour des intensités inférieures à 100 μ T sont beaucoup moins documentés et décrivent aussi une variabilité importante dans les réponses observées, qui peuvent se traduire soit par un déficit de performance d'apprentissage et de mémorisation, soit par l'absence d'effet en fonction du niveau d'intensité et des procédures d'exposition. Chez la souris, Sienkiewicz décrit ainsi un effet limité sur les performances d'apprentissage spatial dans un labyrinthe radial, absent pour une intensité de 7,5 μ T mais visible à 75 μ T, avec dans les deux cas un effet transitoire et réversible après la phase de rétention et ce malgré une nouvelle exposition répétée (Sienkiewicz *et al.* 1998a). Dans le cas d'une exposition précoce, comme chez le rat soumis à un CEM d'une intensité de 100 μ T pendant 22 jours *in utero* puis pendant les 8 premiers jours post natus, la réponse opérante de l'individu adulte à un conditionnement alimentaire s'avère réduite, avec des effets maintenus après la phase d'extinction du conditionnement et sa répétition (Salzinger *et al.* 1990). Cependant une intensité faible de 0,5 μ T appliquée à des rates gestantes et pendant la lactation n'a aucune incidence sur la réponse psychomotrice de la progéniture à des tests de comportement (Chung *et al.* 2004).

Chez les faucons crécerelles, l'étude de Fernie *et al.* décrit une augmentation des comportements de cour et de vigilance chez les mâles pendant la période d'incubation, et une moindre activité de toilettage et de repos pendant la phase de couvaison chez les femelles maintenues en captivité et soumises à une intensité de champ de 30 μ T, 21 h/jour pendant 96 jours. Ces effets n'ont pas d'incidence néanmoins sur la phase de ponte et la taille de la couvée (Fernie *et al.* 2000a).

Dans le cas des animaux de rente, les effets sur les réponses comportementales d'une exposition aux CEM en conditions contrôlées à des intensités inférieures à 100 μ T, n'ont pas été testés. Les travaux concernent des études chez les ruminants (Nguyen *et al.*, 1995) avec un accent porté sur les effets zootechniques et physiologiques (voir partie 4.2.1.2.3).

Les mécanismes sous-jacents

Les mécanismes sous-jacents aux déficits induits par les CEM dans les tâches d'apprentissage/mémorisation restent encore mal connus. Néanmoins, le système cholinergique dans le cerveau, jouant un rôle crucial dans les processus cognitifs (Whishaw et Tomie 1987), est affecté par l'exposition à des CEM (Foroozandeh *et al.* 2011; Foroozandeh *et al.* 2013; Lai et Carino 1999). La transmission cholinergique pourrait être réduite *via* une modification des échanges des ions calcium ou d'autres facteurs, comme le GABA (acide γ -aminobutyrique) (Foroozandeh *et al.* 2011; Foroozandeh *et al.* 2013). A des niveaux élevés de CEM (200 μ T à 1,5 mT), des effets physiologiques, tels qu'une augmentation de la corticostérone plasmatique, ont pu être décrits chez le rat et la souris, qui pourraient résulter d'une stimulation directe du cortex surrénalien (Kitaoka 2013; Kitaoka *et al.* 2013a; Kitaoka *et al.* 2013b; Mostafa *et al.* 2002) et être associés aux réponses comportementales observées. L'implication des CEM dans la modulation des systèmes opioïde et vestibulaire, impliqués dans les processus de recherche de nourriture, d'anxiété, de mouvements et d'équilibre, pourrait expliquer leurs effets observés chez les animaux dans les tests d'anxiété et d'apprentissage associé à un contexte spatial (Liu *et al.* 2008), ce qui reste néanmoins à préciser.

4.1.3.3 Conclusion

En conclusion des travaux relatifs sur l'effet des CEM-EBF sur le comportement :

- (i) les travaux concernent plus particulièrement les espèces modèles rongeurs, et décrivent une variabilité dans les réponses qui est dépendante des niveaux et de la durée d'exposition, ainsi que des paradigmes utilisés pour la mesure des réponses comportementales ;**
- (ii) les données disponibles sur les animaux de rente sont trop limitées pour conclure quant aux effets des CEM sur le comportement, à des intensités d'exposition inférieures à 100 μ T et en particulier pour des intensités de champ et des durées d'exposition telles que mesurées sur le terrain dans l'étude présentée au chapitre 3.3 ;**
- (iii) L'impact des courants parasites générés par des CEM, sur le comportement des animaux de rente reste encore à évaluer.**

4.1.4 Conclusion sur l'aspect neurophysiologique et comportement

Les animaux montrent une sensibilité au CM, qui se traduit dans le cas du CMT par les phénomènes d'orientation et de navigation, ou de migration, bien connus chez de nombreuses espèces d'oiseaux, de poissons, de mammifères marins ou d'insectes (Wiltschko et Wilschko 1995). Chez les animaux de rente, les connaissances sont en revanche plus parcellaires ; l'alignement au CMT est rapporté mais avec des effets transitoires et variables selon les individus. Les données relatives à leur magnétosensibilité apparaissent progressivement sans pour autant que l'origine biologique de ces manifestations comportementales soit encore établie faute de recherches fines sur les mécanismes, en particulier concernant l'implication des cryptochromes. Par ailleurs, la modification de cette perception par les CEM-EBF reste encore à préciser.

Les données bibliographiques relatives à l'impact des courants électriques parasites sur les comportements des animaux se rapportent à des situations où les courants résultent d'un contact direct des animaux avec des structures ou équipements sous tension, particulièrement représentatives d'installations électriques défectueuses ou de dispositifs dont la mise à la terre était défaillante, ou de situation où le courant est induit expérimentalement au niveau des auges ou des abreuvoirs. Ces études concluent à des réponses de stress modérées à sévères, qui varient selon les espèces compte-tenu de leurs différences de résistances corporelles. Par contre, l'impact des courants parasites générés spécifiquement par des CEM, sur le comportement des animaux de rente reste encore à évaluer. Ainsi, il s'avère très difficile d'apprécier ce qui se passe dans les conditions d'élevage, et de conclure sur les effets possibles des CEM-EBF compte-tenu des faibles intensités de ces champs mesurés à proximité d'équipements implantés à faible distance des animaux (voir paragraphe 3.3.2.2 sur la campagne de mesure).

La majeure partie des travaux relatifs à l'effet des CEM sur le comportement des animaux concerne les rongeurs, tandis que les données disponibles sur les animaux de rente restent limitées. Par ailleurs, on peut constater une diversité des paradigmes expérimentaux utilisés en milieu contrôlé, tant sur l'intensité que sur la durée d'exposition aux CEM appliqués, sur les dispositifs de tests auxquels sont soumis les animaux que sur la nature des réponses observées (apprentissage, mémorisation, préférence, anxiété, etc.). La description des dispositifs d'exposition aux CEM est aussi, selon les études, relativement imprécise ne permettant pas de s'assurer d'une exposition efficace et par conséquent de la pertinence des effets rapportés. La variabilité dans les procédures expérimentales explique en partie la difficulté de conclure quant à des effets des CEM, en particulier dans le cas de CEM-EBF. Les données de la littérature sur les rongeurs incitent à rester prudents ; les effets ne sont observés qu'à des niveaux d'exposition très largement supérieurs à 100 μ T.

Les données sur les animaux de rente en milieu non contrôlé sont encore plus restreintes, avec des données parcellaires dans le cas d'une exposition à proximité des lignes HT ou THT (30 μ T pour une ligne à 400 kV). En l'état des connaissances, il est donc difficile de conclure sur l'existence d'effets des CEM-EBF sur les réponses comportementales des animaux de rente dans les conditions classiques d'élevage.

4.2 Performances zootechniques et impact sanitaire

Comme il a été dit précédemment (cf. paragraphe 2.6), on ne peut pas vraiment dissocier les courants parasites des champs électriques et magnétiques à basses fréquences. Les effets des courants parasites chez les animaux de rente, dans la mesure où les données sont disponibles seront donc abordés dans un premier temps, avant de s'intéresser spécifiquement aux effets des CEM.

4.2.1 Effets des champs électromagnétiques sur les performances des bovins laitiers

4.2.1.1 Effets des courants parasites

L'étude des effets des courants parasites chez la vache laitière a fait l'objet d'un certain nombre de travaux scientifiques, plus particulièrement dans les années 90, suite à la mise en évidence de ce phénomène en 1985. L'objectif affiché était d'identifier le niveau d'intensité du courant pour lequel le comportement de l'animal et/ou ses paramètres physiologiques et/ou ses performances zootechniques pouvaient être modifiés et qui était susceptible de provoquer chez l'animal un état d'inconfort voire de mal-être.

Le

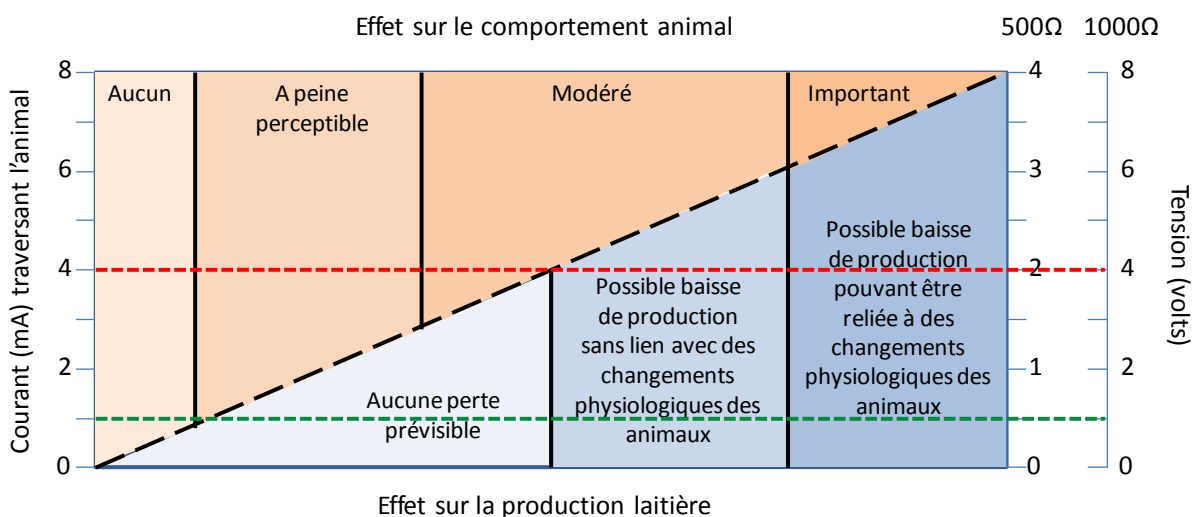
Tableau 15 (Annexe 5) présente une synthèse de ces travaux relatifs à l'impact des courants parasites sur les performances et la santé des animaux, en précisant les conditions expérimentales.

- ✓ L'intensité du courant alternatif (50 ou 60 Hz) appliqué à l'animal a varié de 0,25 à 16 mA.
- ✓ Dans la majorité des études, l'exposition était de courte durée (au minimum sur une journée, au maximum sur 8 semaines), à l'exception de l'étude de Gorewit *et al.* conduite sur une lactation complète (Gorewit *et al.* 1992a; Gorewit *et al.* 1992b).
- ✓ L'application du courant s'est faite avant et/ou pendant la traite, de façon continue ou intermittente. Dans ce dernier cas, elle s'est faite selon un pas de temps variable (5 sec toutes les 30 sec ; 30 sec toutes les minutes ; 60 sec toutes les 2 min ou 5 min toutes les 10 min).

Dans toutes ces études, les conditions sont extrêmement bien contrôlées et donc loin de refléter celles rencontrées dans un élevage, ce qui explique sans doute les effets différents observés sur les performances zootechniques entre des essais expérimentaux et les observations faites en élevage (nervosité, agitation lors de la traite laitière, irrégularité de la quantité de lait produit). La plupart des études en milieu expérimental contrôlé montrent que les courants parasites (dans la gamme des niveaux d'intensité testés) n'ont pas d'impact sur les performances laitières des animaux. De la méta-analyse réalisée en 2009 par Erdreich *et al.* à partir de 22 études, il ressort que, pour des expositions à des courants de 3 mA, pendant 3 à 4 semaines, ni la production de lait, ni sa qualité ne sont affectées, quel que soit le trajet parcouru par le courant dans le corps de l'animal et même si les tensions sont appliquées en salle de traite (Erdreich *et al.* 2009; Gorewit *et al.* 1992a; Henke Drenkard *et al.* 1985). Ce seuil de 3 mA est également cité dans une étude conduite sur plus de 4 000 troupeaux bovins laitiers (Erdreich *et al.* 2009) comme n'affectant pas la production laitière. Le temps de traite n'est lui non plus pas modifié par des courants de 3,6 à 8 mA, que ce soit pour des tensions de contact (Henke Drenkard *et al.* 1985) ou des tensions de pas (Lefcourt *et al.* 1985). Seuls, Lefcourt et Akers ont enregistré une diminution de la production laitière (- 12 %) et de la durée de traite (- 51 secondes) suite à l'application aléatoire, lors de la traite, d'un courant d'une intensité de 5 mA, sans toutefois observer de modifications

physiologiques concomitantes des concentrations plasmatiques en ocytocine et en catécholamines (Lefcourt et Akers 1982). Par ailleurs, mise à part l'étude de Gorewit *et al.* réalisée sur une lactation complète et qui n'a montré aucun effet de l'exposition à des courants compris entre 2,6 et 8,8 mA (Gorewit *et al.* 1992a; Gorewit *et al.* 1992b), les mesures ont été réalisées la plupart du temps sur une durée de temps très réduite et sur un nombre trop restreint d'animaux, pour pouvoir mettre en évidence des effets significatifs. En ce qui concerne l'état sanitaire des animaux, les observations en élevages laitiers semblent montrer que la présence de courants électriques parasites pourrait augmenter l'occurrence de mammites (Churchward 1948; Kirk *et al.* 1984; Wilson *et al.* 1996). Cependant, aucune étude en milieu expérimental contrôlé n'a confirmé cette hypothèse (Gorewit *et al.* 1989; Gorewit *et al.* 1992b; Henke Drenkard *et al.* 1985; Lefcourt *et al.* 1985; Rigalma *et al.* 2010; Southwick *et al.* 1992). Chez des vaches laitières, l'application d'un courant électrique de 1,2 à 12,1 mA au niveau de l'abreuvoir durant une lactation complète, n'a eu d'effet ni sur l'incidence des mammites, ni sur l'apparition de boiteries, ni sur les performances de reproduction (Gorewit *et al.* 1992a; Gorewit *et al.* 1992b). Pour la même intensité de courant, les travaux de Reinemann *et al.* ont également montré l'absence d'effet sur la fonction immunitaire, tant au niveau cellulaire qu'humoral (Reinemann *et al.* 1999).

Des conclusions d'un groupe d'experts scientifiques américains et canadiens (Lefcourt 1991), Figure 15, il ressort que des courants en deçà de 4 mA (ligne rouge), correspondant à une tension de 2 ou 4 V pour une résistance corporelle respective de 500 Ω ou 1000 Ω (échelle de droite) ne modifient pas les performances lactières des animaux et que le seuil de réponse comportementale se situe entre 1 et 2 mA (ligne verte). La Figure 15 illustre la réponse attendue en termes de comportement et de performance lactière, selon le niveau d'intensité du courant traversant l'animal. La projection d'une valeur de courant ou de tension sur la diagonale (en pointillé noir) donne l'effet probable de celle-ci sur le comportement animal et la production lactière.



L'intensité du courant (échelle de gauche) est la valeur physique à considérer pour inférer ses conséquences sur le comportement ou la production. Deux échelles (à droite) peuvent être utilisées selon la résistance corporelle de l'animal : une échelle de 0 à 4 V pour une résistance moyenne de 500 Ω; une échelle de 0 à 8 V pour un animal installé sur une litière sèche ayant une résistance plus élevée.

Figure 15 : Effets des niveaux de courant sur le comportement et la production lactière (Lefcourt 1991)

4.2.1.2 Effets des champs électromagnétiques

Les premiers travaux réalisés pour évaluer les effets biologiques des CEM sur les performances zootechniques chez les ruminants se sont appuyés sur des études de surveillance sanitaire d'exploitations proches de lignes électriques (Algers *et al.* 1981; Amstutz et Miller 1980; Rogers *et al.* 1982; Ware 1974; Williams et Beiler 1979) et sur des études épidémiologiques (Algers *et al.* 1981; Algers et Hennichs 1985; Busby *et al.* 1974; Martin *et al.* 1986; Ware 1974), dans un environnement électrique et magnétique qui peut être qualifié de "non contrôlé". Des études dans des conditions semi-contrôlées ont ensuite été conduites en Suède (Algers et Hultgren 1987) et aux Etats-Unis (Busby *et al.* 1974; Hefeneider 1994; Hefeneider *et al.* 2001; Raleigh 1988; Stormshak *et al.* 1993), en plaçant des animaux dans des enclos, directement sous une ligne HT/THT ou à une certaine distance de celle-ci. Les expériences les plus poussées sont certainement celles engagées au Canada par Hydro-Québec à partir de 1987, en coopération avec l'Union des producteurs agricoles québécois. A leur demande, une chambre expérimentale d'exposition contrôlée a été mise au point permettant de créer et d'appliquer un CEM relativement constant sur des animaux maintenus dans des conditions proches de celles régnant sur une exploitation (Nguyen *et al.* 1995).

4.2.1.2.1 *Suivis sanitaires en exploitations et études épidémiologiques, en conditions non contrôlées*

De toutes les enquêtes faites sur des exploitations et études sur des cohortes de troupeaux, il ne ressort pas d'effet net des CEM créés par des lignes de transport de courant alternatif sur différents paramètres (comportement, fertilité, production laitière et statut sanitaire) mesurés chez les bovins. Cependant, selon le niveau d'exploitation du réseau électrique, la quantité de courant passant dans les lignes peut considérablement varier dans le temps et induire de ce fait des CEM non uniformes, ce qui peut expliquer les réponses très variables des animaux d'une étude à une autre.

Ainsi, Busby *et al.* (Busby *et al.* 1974) ont suivi la production laitière sur 4 exploitations, avant et après installation d'une ligne de 765 kV (60 Hz). Si, sur deux exploitations, la production laitière était plus élevée avant l'installation de la ligne, aucun effet n'a été observé dans les deux autres exploitations. De même, le suivi de données de lactation pendant 6 ans, sur 516 élevages (soit 24 000 lactations enregistrées) classés selon la distance par rapport à une ligne de 400 kV, n'a montré aucun effet des niveaux d'exposition sur la production laitière, l'intervalle vêlage-vêlage et le taux de réforme (Martin *et al.* 1986). Aux Etats-Unis, 11 exploitations ovines, équinnes, porcines et bovines (578 bovins dont 434 bovins lait) ont fait l'objet d'une surveillance sanitaire en raison de leur proximité de la ligne Dumont-Jefferson (765 kV; 60 Hz) et du pâturage des animaux sur des parcelles situées sous ou près de cette ligne. Les résultats de cette étude ont montré que ni le niveau de production des animaux, ni leur santé n'ont été perturbés par le CE créé qui a varié de 2,5 kV/m à 12 kV/m, selon la distance entre l'exploitation et la ligne. Dans le rapport d'Algers *et al.*, sur 36 troupeaux pâturant pendant l'été sous une ligne THT de 400 kV (50 Hz) durant 7 jours par an, les animaux n'ont présenté aucun problème de fertilité alors qu'une autre enquête conduite en Suède a montré des problèmes de fertilité sur deux troupeaux exposés aussi à une ligne de 400 kV (50 Hz), pour une durée d'exposition de l'ordre de 25 à 55 jours par an (Algers *et al.* 1981). Toutefois, cette baisse de fertilité enregistrée pendant la période de pâturage n'a pas empêché l'entrée en gestation des animaux. Une enquête conduite antérieurement sur 55 exploitations laitières sur une période de 4 à 6 ans, avant et après construction d'une ligne de courant de 765 kV, n'avait pas mis en évidence d'effet négatif sur la fertilité, ni d'augmentation du taux de

mortalité des veaux ou de cas de malformation à la naissance (Williams et Beiler 1979). Une autre enquête rétrospective sur la fertilité des vaches exposées à des lignes THT de 400 kV pendant plus de 15 jours par an, auprès de 106 exploitations en Suède, n'a montré aucun effet sur les performances de reproduction et le taux d'infécondité des animaux (Algers et Hennichs 1985).

4.2.1.2.2 Essais terrain, en conditions semi-contrôlées

Le Tableau 16 Annexe 5, présente une synthèse des travaux réalisés en conditions semi-contrôlées. Des CE et CM de faible intensité respectivement 4 kV/m – 2 μ T et 6 kV/m - 3,37 μ T, ont été testés sur la génisse (Algers et Hultgren 1987) et la brebis (Lee Jr *et al.* 1993; Thompson *et al.* 1995). Selon la catégorie de ruminant, la durée de l'exposition a varié : de 120 jours chez la génisse (Algers et Hultgren 1987; Hultgren 1989) jusqu'à 300 jours chez la brebis (Lee Jr *et al.* 1993) voire 810 jours chez l'agnelle (Hefeneider *et al.* 2001).

L'exposition de 774 bovins à viande (vaches allaitantes et veaux) à un CE moyen estimé de 5.6 kV/m sous une ligne THT de 500 kV pendant 3 ans n'a pas affecté la consommation alimentaire, la santé, le taux de mortalité, la reproduction, le nombre de veaux sevrés, le taux de vêlage, le développement sexuel des veaux et le poids de carcasse (Angell *et al.* 1990; Raleigh 1988). Aucune différence sur la régularité du cycle oestral, la concentration plasmatique de progestérone, l'intensité de l'oestrus, le taux de morbidité et de malformations foetales n'a été détectée sur 58 génisses logées au-dessous d'une ligne de 400 kV (50 Hz) et exposées pendant 120 jours à un CEM estimé à 4 kV/m et 2 μ T (Algers et Hultgren 1987). Ces résultats ont été confirmés chez la vache laitière exposée dans les mêmes conditions (pendant 120 jours; CEM moyen estimé de 4 kV/m et 2 μ T) : le CEM n'a pas influencé l'expression de l'oestrus, le taux sanguin de progestérone, le poids des ovaires, la taille du corps jaune, ou le taux de gestation (Hultgren 1989). Un essai s'est intéressé aux effets d'un CEM de 6,25 kV/m et 3,77 μ T créé dans un corridor de 3 lignes THT (une de 500 kV et deux de 230 kV) chez des agnelles exposées pendant 300 jours (Stormshak *et al.* 1993). Encore une fois, aucun effet n'a été mis en évidence sur le comportement, la croissance de la laine, l'âge de la puberté et les taux de cortisol et de mélatonine chez les animaux. Seuls des problèmes de mycose sur la peau des animaux exposés ont été notés, dus à un éventuel dysfonctionnement du système immunitaire.

Conclusion

En l'état actuel des connaissances, l'immense majorité des résultats de ces essais de terrain, ne montre pas un effet détectable des CEM sur les performances et la santé des bovins, avec les réserves mentionnées ci-dessous :

(i) l'intensité du CEM et la durée d'exposition des animaux sont variables d'un essai à l'autre ;

(ii) les CE et CM n'ont pas été précisément mesurés et les valeurs moyennes données sont seulement des estimations ;

(iii) dans certains essais, les animaux pourraient n'avoir jamais été exposés pendant certaines parties de la journée, voire pendant plusieurs jours consécutifs parce que le courant circulant dans les lignes HT ou THT varie, tout comme la distance entre les animaux et la ligne (les animaux dans des enclos se déplacent et ne sont pas en permanence à la valeur de champ la plus élevée). Ces deux facteurs peuvent affecter l'intensité du CEM auquel les animaux sont exposés et en conséquence leurs réponses comportementale, zootechnique et physiologique.

4.2.1.2.3 Etudes expérimentales en conditions contrôlées

✓ Chambre expérimentale d'exposition contrôlée

Mise au point par des chercheurs du Département des sciences animales de l'Université McGill afin d'étudier les effets des CEM sur la vache laitière, la chambre expérimentale d'exposition contrôlée (Figure 16) a été conçue pour générer, aussi fidèlement que possible, un CEM identique à celui prévalant dans des zones rurales traversées par une ligne haute tension de 735 kV conduisant un courant alternatif de 2 000 A (Nguyen *et al.* 1995). Les animaux sont placés à l'intérieur de la chambre (L = 15 m, l = 10 m, H = 3 m) dans des cages à métabolisme individuelles, en bois, afin de réduire au minimum la perturbation du CE. Les tensions parasites sont réduites à de très faibles valeurs (moins de 1 mV). La durée d'exposition est de 21 heures par jour. La chambre, aérée et chauffée artificiellement, permet l'exposition simultanée de huit vaches maximum. Un courant de 1,04 A génère un champ magnétique uniforme horizontal de 30 μ T grâce à 14 bobines rectangulaires (L = 10 m, H = 4 m). Le champ électrique (10 kV/m) vertical est, quant à lui, généré par deux plaques (L = 9 m; l = 6,5 m) suspendues à 0,4 m du plafond par des isolants et dont la capacité électrique totale est de 4,3 nF (nanofarad). La variation du champ magnétique autour de l'animal est de l'ordre de 2 à 3 % et celle du champ électrique de 7 %. A la différence de la situation réelle existant sous une ligne HT/THT pour laquelle le CEM créé est généralement circulaire, l'angle de phase entre le champ électrique et magnétique dans la chambre est de 65°. Les deux champs sont continuellement mesurés grâce à des sondes placées en trois points de la chambre, vérifiées et calibrées au début de chaque exposition par rapport à une sonde de référence. Si la fréquence est de 60 Hz, un générateur de 3 kW permet de sélectionner d'autres fréquences.

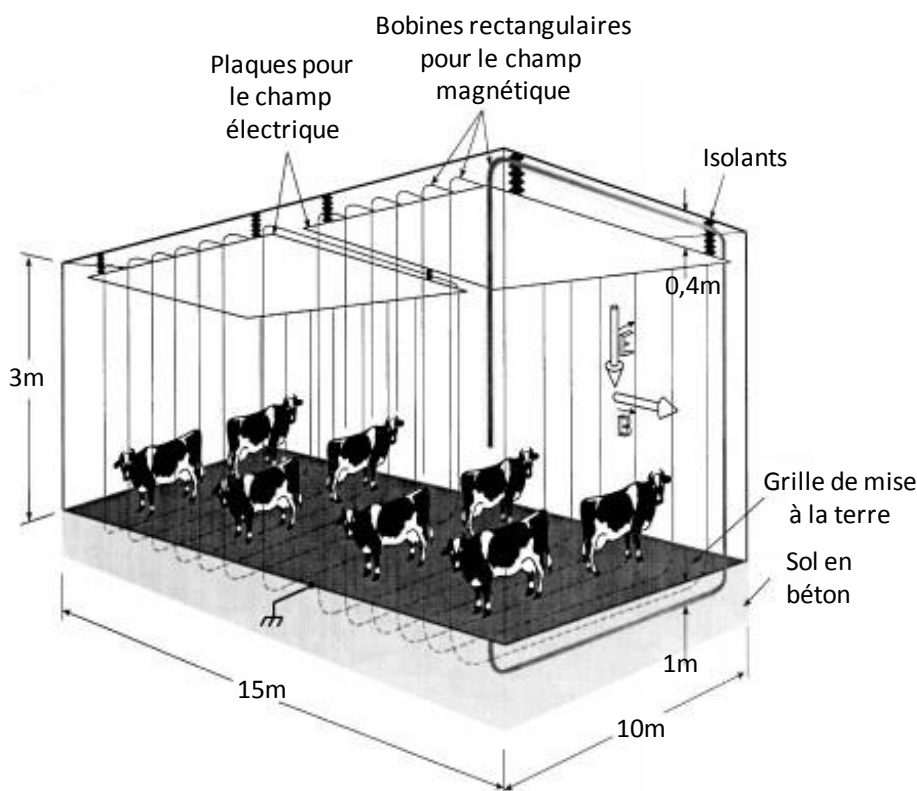


Figure 16 : Chambre d'exposition contrôlée (Nguyen *et al.* 1995)

✓ Résultats des expérimentations

Le Tableau 17 (Annexe 5) présente une synthèse des travaux réalisés en conditions contrôlées. Tous ces travaux se sont intéressés aux effets combinés des CE et CM, à l'exception de deux études (Burchard *et al.* 2007; Burchard *et al.* 2004) conduites chez la génisse et dont l'objectif était de voir la contribution spécifique du CE ou du CM à d'éventuels effets biologiques, afin de déterminer si l'un ou l'autre pouvait, à lui seul, produire les mêmes effets que les deux champs combinés.

- ✓ La grande majorité des études a porté sur la vache laitière, les animaux ayant été exposés à un CEM très élevé, *i.e.* un CE de 10 kV/m et un CM de 30 μ T. Il s'agit là de valeurs maximales présentes sous une ligne de 735 kV à courant alternatif, caractéristiques de conditions extrêmes d'exploitation du réseau électrique. Il faut cependant préciser que dans les fermes du Québec, les conditions réelles d'exposition des vaches laitières aux CEM sont différentes. En effet, les valeurs maximales relevées dans la zone de pâturage directement sous les conducteurs des lignes de 735 kV étaient deux fois moins élevées pour le champ électrique (5,3 kV/m) et cinq fois moins pour le champ magnétique (6,4 μ T) que les niveaux appliqués dans la chambre expérimentale d'exposition (Maruvada *et al.* 1996).
- ✓ Les animaux ont été exposés sur une durée n'excédant pas 30 jours, durant des périodes de clarté et d'obscurité, généralement de 12 h chacune ou de 8 h et 16 h respectivement (Burchard *et al.* 2006; Rodriguez *et al.* 2004; Rodriguez *et al.* 2003; Rodriguez *et al.* 2002).

Burchard *et al.* ont mis en évidence une diminution de près de 5 % de la production de lait brut, de 14 % de la production de lait standard corrigé¹⁵ et de 16 % de la teneur en matières grasses du lait et une augmentation de 5 % de la consommation de matière sèche (MS) suite à l'exposition de vaches laitières à un CEM de 10 kV/m et 30 μ T (Burchard *et al.* 2003). Burchard *et al.* avaient déjà enregistré une augmentation de 5,5 % de la consommation de MS chez des vaches en gestation exposées au même CEM (Burchard *et al.* 1996). Par contre une hausse de la production de lait standard corrigé (+ 9 %) et du taux butyreux (TB) du lait (+ 9%) avait été obtenue dans leur essai. Une augmentation de la quantité de MS ingérée (+ 6 %) et une diminution du TB du lait (- 6,3 %) ont été notées par Rodriguez *et al.* mais sans modification de la production laitière alors que le poids corporel des vaches s'est accru de 4 % (Rodriguez *et al.* 2002). Burchard *et al.* ont aussi relevé une amélioration du poids vif (+ 1,2 %) et du gain moyen quotidien (GMQ) (+ 30 %) chez des génisses au 7^{ème} mois de gestation, exposées au seul CM (Burchard *et al.* 2007). Dans cet essai, et comparativement à celui testant les effets du seul CE (Burchard *et al.* 2004), les auteurs ont mis en évidence une diminution du taux de prolactine et d'IGF-1, de 15 et 4 % respectivement (Tableau 17 en Annexe 5). Dans certaines de ces études (Burchard *et al.* 1996; Rodriguez *et al.* 2002) une interaction significative traitement \times jours d'exposition est généralement ressortie des analyses statistiques des résultats, suggérant que l'ampleur des effets des CEM pourrait varier dans le temps en raison d'une adaptation éventuelle des animaux.

¹⁵ La production théorique d'une vache est calculée en lait standard à 4 % de matières grasses. On effectue le calcul suivant : lait standard = 0,4 L + (15 x L x MG) dans lequel L est la quantité de lait produit et MG le taux de matières grasses du lait.

✓ Conclusion

En conclusion, les résultats des quelques études conduites en milieu contrôlé montrent un effet positif du CE et/ou CM (10 kV/m et/ou 30 μ T) sur la consommation de matière sèche et un impact variable sur la production laitière chez des bovins exposés sur une durée relativement limitée, n'excédant pas 30 jours.

4.2.2 Effet des champs électromagnétiques sur les monogastriques

4.2.2.1 Effets chez les volailles

4.2.2.1.1 *Effet des champs électromagnétiques sur le développement embryonnaire (Tableau 18 en Annexe 5)*

✓ Exposition à des CEM appliqués en continu ou pulsés

De nombreuses études ont été réalisées sur l'effet des CEM sur les œufs fécondés ; les CEM sont appliqués selon deux modalités : en continu ou pulsé. Des études menées par l'équipe de Ubeda [exposition durant 48 heures en début d'incubation à un champ pulsé (appliqué pendant 500 μ s avec des temps de pause de 100 μ s) de 100 Hz d'une intensité de 1 et 13,9 μ T (Ubeda *et al.* 1983) ou d'une intensité de 1 μ T appliqué pendant 500 μ s avec des temps de pause soit de 85 μ s ou de 2,1 μ s (Ubeda *et al.* 1994)], et en 2011 par l'équipe de Roda (exposition durant 45 heures en début d'incubation à un champ pulsé (appliqué pendant 1 s avec des temps de pause de 0,5 s) de 50 ou 100 Hz et d'une intensité de 10 μ T (Roda *et al.* 2011)) montrent que les champs pulsés peuvent, comme les CEM appliqués en continu, entraver le développement embryonnaire et altérer le développement neural. Cependant, une étude menée en 1991 sur des embryons de 4 jours, exposés durant 100 h à un champ pulsé (5 ms toutes les 67 ms) de 15 Hz et d'une intensité de 2,1 mT ne met pas en évidence de désordre dans le développement embryonnaire (Coulton et Barker 1991).

Trois études menées sur des œufs embryonnés en début d'incubation et utilisant des CEM continus (Delgado *et al.* 1982) ou pulsés à 100 μ s (Ubeda *et al.* 1983) ou bipolaires (Terol et Panchon 1995) de fréquences et/ou d'intensités variables, ont montré un effet inhibiteur sur le développement embryonnaire ou un effet tératogène lorsque la fréquence du CEM est de 100 Hz pour une durée d'exposition de 48 heures à une intensité de 0,12 à 1,2 μ T pour l'étude de Delgado *et al.* (Delgado *et al.* 1982), une durée d'exposition de 48 heures à une intensité de 0,4 à 104 μ T pour l'étude de Ubeda *et al.* (Ubeda *et al.* 1983) et une durée d'exposition de 21 jours à une intensité de 0,2 à 3,2 μ T pour l'étude de Térol et Panchon (Terol et Panchon 1995). Ces auteurs ont observé que l'effet négatif du CEM n'était pas identique pour toutes les intensités de champ. En particulier, l'effet néfaste maximal du CEM sur le développement embryonnaire pour Delgado *et al.* et sur les malformations de l'embryon (effet tératogène) pour Ubeda *et al.* (1983) ainsi que Térol et Panchon (1995) se fait sentir pour des CEM de fréquence 100 Hz de certaines intensités seulement (1,2 μ T pour Delgado *et al.*, 1 μ T et 13,9 μ T pour Ubeda *et al.*, et 1,2 μ T pour Térol et Panchon). Cet effet négatif est moins important pour des intensités de champ plus fortes ou plus faibles. Les auteurs désignent ce phénomène comme un « effet fenêtre ». Ce type d'effet a été également décrit plus tard par Lahijani et Sajadi (2004). Dans leur étude, ces auteurs ont exposé à un CEM continu (50 Hz, 1,33 - 7,32 mT) des œufs fécondés, pendant 24 heures avant l'incubation. Outre le fait de démontrer qu'il est possible de générer des embryons anormaux par une exposition à un CEM avant incubation, Lahijani et Sajadi montrent également que les effets négatifs d'un CEM dépendent de façon non linéaire de l'intensité de ce champ (« effet fenêtre »)

(Lahijani et Sajadi 2004). En effet, ils ont observé davantage d'embryons anormaux avec une intensité de 4,9 à 6,65 mT.

✓ Effet de la durée et du moment d'exposition

Une exposition très courte à un CEM avant incubation peut entraîner des conséquences sur les poulets en croissance issus de ces œufs. Ainsi, si une exposition d'œufs fécondés à un CEM (50 Hz, 1,8 mT) avant l'incubation n'influence pas l'éclosabilité et le poids des œufs à l'éclosion, quelle que soit la durée de l'exposition (de 15 à 75 min), on note en revanche que pour des durées d'exposition de 60 et 75 minutes, le poids des poulets issus de ces œufs est plus faible et la conversion alimentaire moins bonne durant les 39 jours d'étude (Shafey *et al.* 2011). Une étude menée récemment par Roda *et al.* (exposition de 45 h à 21 jours, après le début de l'incubation, fréquence de 50 ou 100 Hz, champs pulsé d'une durée de 1 s toutes les 0,5 s, intensité 10 µT) montre que les CEM peuvent causer des désordres de développement des somites¹⁶ dès 45 h d'exposition (Roda *et al.* 2011). Youbicier-Simo *et al.* ont quant à eux montré qu'une exposition continue durant toute l'incubation à une télévision cathodique allumée ou à un écran d'ordinateur en marche (15 à 80 Hz) entraîne une forte mortalité embryonnaire (de 47 à 68 %) (Youbicier-Simo *et al.* 1997).

Pour Lotfi et Narimani-Rad, il existe des stades de développement embryonnaire (1^{er} ou 2nd tiers de la vie embryonnaire) où l'exposition à un CEM continu (de 2 h par jour après le début d'incubation, fréquence 50 Hz, intensité 0,5 mT) cause le maximum de mortalité (Lotfi et Narimani-Rad 2012). Par contre dans l'étude de Roda *et al.*, c'est au 3^{ème} tiers de la vie embryonnaire (après une période d'exposition de 21 jours) que le maximum des effets du CEM (altération du développement des somites) est observé (Roda *et al.* 2011).

✓ Effet tératogène ou non ?

Dans ce qui précède, nous avons vu que certains auteurs décrivent des effets tératogènes des CEM. Cependant, cet effet est controversé. L'équipe de Roda *et al.* a montré en 2011 que l'exposition à un CEM pulsé ou continu n'a jamais entraîné d'effet tératogène dans leur étude mais des désordres du développement des somites. Ceci est contraire aux résultats de Delgado *et al.* (Delgado *et al.* 1982), de Ubada *et al.* (Ubada *et al.* 1983), de Térol et Panchon (Terol et Panchon 1995), et de Lahijani (Lahijani et Sajadi 2004).

✓ Effet sur les paramètres sanguins du jeune poussin

Divers auteurs ont examiné les effets des CEM sur les paramètres sanguins. Ainsi Youbicier-Simo *et al.* dans leur étude d'exposition continue durant toute l'incubation, à un écran d'ordinateur ou un écran de télévision, ont montré une chute des taux plasmatiques d'IgG, de corticostérone et de mélatonine chez le jeune poussin (Youbicier-Simo *et al.* 1997). L'équipe de Lotfi a quant à elle mesuré les conséquences d'une exposition d'œufs fécondés sur les paramètres sanguins à l'éclosion. Lotfi *et al.* ont montré qu'un CEM (50 Hz, 0,5 mT, 2 h d'exposition par jour à différents stades du développement embryonnaire) n'avait pas d'effet sur les concentrations plasmatiques en cholestérol total, triglycérides, acide urique et fer (Lotfi et Narimani-Rad 2012). Les seules différences entre les poussins ayant été exposés et le groupe contrôle concernent la concentration plasmatique en glucose, plus faible chez les poussins ayant été exposés à la 3^{ème} semaine d'incubation et la concentration en thyroxine (T4), plus forte chez les poussins exposés durant les

¹⁶ Somites : structures embryonnaires situées de part et d'autres du tube neural qui constituera le futur système nerveux central de l'organisme.

14 premiers jours d'incubation. Les concentrations en tri-iodothyronine (T3) n'ont pas été affectées par l'exposition au CEM.

4.2.2.1.2 Effet des champs électromagnétiques sur les performances de reproduction des oiseaux (Tableau 19 en Annexe 5)

Les altérations éventuelles du développement embryonnaire ne sont pas abordées dans ce paragraphe car elles sont traitées plus haut.

En 1975, Krueger *et al.* ont exposé à un CEM (60 Hz, 1 600 V/m) des poules reproductrices en début de ponte, durant 12 semaines ; ils ont observé une meilleure fertilité, une diminution de la proportion de poussins mâles, alors que le taux d'éclosion n'était pas affecté. Ils ont néanmoins noté une plus faible production d'œufs en début de ponte, mais qui, après 11 semaines de ponte, redevenait semblable à la production des témoins (Krueger *et al.* 1975).

Dès 1977, Gilmer et Wiehe décrivent des performances de reproduction similaires chez des buses exposées à un CEM (généré par une ligne THT de 230 kV dans les pylones de laquelle les oiseaux ont fait leur nid) et non exposées (Gilmer et Wiehe 1977). Les mêmes résultats sont observés par Steenhof *et al.* chez le corbeau, l'aigle royal et la buse à queue rousse (Steenhof *et al.* 1993), et par Doherty et Grubb chez l'hirondelle (Doherty Jr et Grubb Jr 1998). En 1993, Steenhof *et al.* montrent des performances de reproduction supérieures chez la buse rouilleuse exposée à un CEM (généré par une ligne THT de 500 kV dans le pylone de laquelle les oiseaux ont fait leur nid) (Steenhof *et al.* 1993). De tels résultats ont également été obtenus chez le faucon crécerelle exposé à un CEM (60 Hz, 30 μ T) (Fernie *et al.* 2000a; Fernie et Reynolds 2005). En revanche, Doherty et Grubb trouvent que des hirondelles exposées à un CEM (généré par une ligne THT de 765 et 69 kV sous laquelle les oiseaux ont fait leur nid) ont de moins bonnes performances de reproduction que des hirondelles non exposées (Doherty Jr et Grubb Jr 1998).

Hamann *et al.* trouvent des résultats très contradictoires sur l'effet des CEM sur la taille des œufs de passereaux. Cette dernière est soit similaire (cas de la sitelle torchepot et de la mésange noire) soit plus faible (cas de la mésange charbonnière) soit plus élevée (cas de la mésange bleue) chez les animaux exposés à un CEM (100 kV, 50 Hz) (Hamann *et al.* 1998). Ces résultats sur la mésange charbonnière sont en contradiction avec les travaux de Tomás *et al.* qui trouvent des œufs de taille supérieure chez des oiseaux exposés au CEM (66 kV, 50 Hz) (Tomás *et al.* 2012). Fernie *et al.* trouvent aussi une taille des œufs plus élevée chez des faucons crécerelles exposés à un CEM (60 Hz, 30 μ T) (Fernie *et al.* 2000b).

Les résultats sur la taille de la couvée apparaissent également contradictoires. En effet, Hamann *et al.* décrivent une diminution de la taille de la couvée de mésanges charbonnières exposées à un CEM généré par une ligne HT de 100 kV (Hamann *et al.* 1998), alors que Tomás *et al.* trouvent le résultat inverse chez des mésanges charbonnières exposées à un CEM généré par une ligne HT de 66 kV près de laquelle les oiseaux ont fait leur nid (Tomás *et al.* 2012).

4.2.2.1.3 Effet positif des champs électromagnétiques sur la coccidiose

Cuppen *et al.* et Elmusharaf *et al.* ont étudié l'effet d'un CEM sur des poulets atteints de coccidiose (Cuppen *et al.* 2007; Elmusharaf *et al.* 2007). Ils ont trouvé que l'exposition de ces poulets à un CEM (50 Hz, respectivement 6,5 et 5 μ T, 30 min/j durant respectivement 36 et 21 jours), a réduit les lésions intestinales et a amélioré la conversion alimentaire. Ils en concluent que l'exposition des poulets aux CEM-EBF peut être utile dans le contrôle de la coccidiose et émettent l'hypothèse d'une possible utilisation des CEM comme alternative aux traitements contre la coccidiose.

4.2.2.1.4 Conclusion

De manière générale,

(i) La majorité des études mettent en évidence des effets défavorables des CEM sur le développement embryonnaire, mais avec un effet fenêtre et plutôt aux niveaux intermédiaires d'intensité ;

(ii) Quelques études montrent cependant des effets favorables des CEM ; par exemple, ils réduisent les lésions intestinales des poulets atteints de coccidiose. L'hypothèse est que l'exposition à un CEM stimulerait le système immunitaire. Des effets favorables des CEM s'observent également sur la reproduction de certains oiseaux (la poule reproductrice, le faucon crécerelle, le balbuzard) ; par contre des effets défavorables d'une exposition à un CEM sont observés chez l'hirondelle.

4.2.2.2 Effet des champs électromagnétiques chez les porcins

4.2.2.2.1 Effets des courants parasites

L'impact des courants électriques parasites sur les performances des porcs a été étudié de manière limitée et les travaux sont relativement anciens.

A partir d'informations fournies par des producteurs et des vétérinaires, plusieurs auteurs rapportent des déficits de croissance et de reproduction dans des élevages concernés par ces courants parasites (Gillespie 1984; Stetson *et al.* 1979; Stetson *et al.* 1981; Wright *et al.* 1985). Stetson *et al.* rapportent ainsi pour des courants de 5 à 10 V entre les abreuvoirs et le sol, une occurrence accrue de mammite chez la truie et de diarrhée chez le porcelet, un taux de croissance réduit et une mortalité avant sevrage accrue (Stetson *et al.* 1979). L'étude de Gustafson *et al.* décrit aussi une réduction de la consommation d'eau de porcs charcutiers avec l'application d'une tension de 2,8 et 3,6 V (Gustafson *et al.* 1986). Néanmoins des travaux canadiens menés dans un cadre expérimental contrôlé, en appliquant des tensions électriques entre les auges ou des abreuvoirs et le plancher métallique variant entre 0 et 8 V (Tableau 20, Annexe 5), ne montrent pas d'effet majeur des tensions parasites appliquées sur les performances, sur l'apparition de lésions gastriques ou le profil métabolique de porcs en croissance (Godcharles *et al.* 1993; Robert *et al.* 1992a; Robert *et al.* 1991). Chez la truie reproductrice soumise à des tensions de contact au niveau de la mangeoire et/ou de l'abreuvoir, ou soumise à des tensions de pas (onglons avant-onglons arrière) de 2,5 ou 8 V (entre 1,8 mA et 14 mA), la santé et les performances de reproduction n'ont pas été détériorées (Robert *et al.* 1996). Ces auteurs soulignent néanmoins la nécessité de vérifier ces résultats dans des conditions de terrain, dans lesquelles des blessures aux membres ou un sol humide peuvent accentuer l'effet du voltage subi (Robert *et al.* 1992b). La perception des tensions électriques est en effet rapportée à une valeur aussi faible que 0,25 mA (Gustafson *et al.* 1986). L'étude de Matte *et al.* rapporte aussi des variations de l'impédance corporelle selon la différence de potentiel chez des porcs entre 9 et 22 semaines, 1 300 Ω à 2 V vs 1 031 Ω à 5 V pour une fréquence de 60 Hz (Matte *et al.* 1992). Un effet de l'âge est observé aussi sur l'impédance corporelle dans le cas d'un sol sec comparé à un sol humide, les valeurs étant supérieures sur sol sec à l'âge de 10 semaines (3 041 vs 1 031 Ω), et la différence entre les 2 types de sol étant moins marquée à 18 semaines (1 036 vs 778 Ω).

4.2.2.2 Effets des champs électromagnétiques sur les performances de croissance et de reproduction

Les données disponibles restent parcellaires. Ainsi Mahmoud *et al.* ne rapportent aucun effet d'une exposition à proximité d'une ligne THT de 345 kV, sur les performances de croissance et de reproduction chez des porcs soumis à un CE de 3,5 à 4,5 kV/m (Mahmoud *et al.* 1989). Dans le cadre d'études en milieu contrôlé, l'effet d'une application de CEM a été testé chez des verrats par l'équipe de Bernabò *et al.*, sur les capacités de reproduction des animaux, le porc étant utilisé comme modèle pour l'homme (Bernabò *et al.* 2007; Bernabò *et al.* 2010). Dans la première étude (Bernabò *et al.* 2007), des spermatozoïdes de verrats matures étaient exposés *in vitro* pendant 4 h à un CEM de fréquence 50 Hz et de 1 mT, afin d'évaluer leur capacité à l'acquisition d'une compétence de fertilité. Au terme d'une heure d'incubation, il apparaît une réduction de la motilité et de la capacité de pénétration dans l'ovocyte, tandis que des dégâts morphologiques apparaissent sur la membrane plasmique et au niveau de l'acrosome après 2 à 4 h d'incubation. Il est suggéré que ces effets seraient associés à un effet défavorable des champs sur les mécanismes impliqués dans l'homéostasie des ions Ca^{2+} intracellulaires. Dans la seconde étude (Bernabò *et al.* 2010), l'exposition des spermatozoïdes était d'une heure à 50 Hz, avec des intensités variant de 0 à 2 mT. Les effets sur l'intégrité morpho-fonctionnelle des spermatozoïdes incluaient un dommage progressif de l'acrosome au-delà de 0,5 mT compromettant la capacité de fertilisation *in vitro*. Ces effets atteignent un plateau à 1 mT. *In vivo*, chez des truies exposées à des CEM de 1 mT pendant 4 heures après l'ovulation et en situation d'insémination artificielle (oviducte en présence de spermatozoïdes), les effets des CEM se traduisent par une fonction spermatique dégradée et un taux de fertilisation réduit. De plus, l'exposition du tractus génital, en l'absence de spermatozoïdes, à des champs supérieurs à 0,75 mT affecte négativement le développement de l'embryon. On peut noter que les effets délétères des CEM sur la fonction de reproduction ont été obtenus à des intensités largement supérieures aux niveaux auxquels on peut s'attendre en élevage.

4.2.2.3 Conclusion

En l'état des travaux réalisés, il est difficile de conclure sur l'effet des CEM et des courants parasites sur les performances zootechniques des porcs en conditions d'élevage.

4.2.3 Conclusion sur les réponses zootechniques et l'impact sanitaire

Chez les bovins, la plupart des études en milieu expérimental contrôlé, montre que les courants parasites (dans la gamme des niveaux d'intensité testés) n'ont pas d'impact sur les performances laitières des animaux. Dans toutes ces études, les conditions sont extrêmement bien contrôlées et donc loin de refléter celles rencontrées en élevage, ce qui explique sans doute les effets différents observés sur les performances zootechniques entre des essais expérimentaux et les observations faites en élevage. Dans le cas d'une exposition aux CEM les résultats des études conduites en milieu contrôlé (30 μ T, 10 kV/m), rapportent des effets potentiels sur les performances des animaux (augmentation de l'ingéré et impact variable sur la production laitière). Par contre, les résultats des essais de terrain, avec la proximité de lignes HT/THT ne montrent pas un effet détectable des CEM sur les performances et la santé des bovins, avec les réserves liées à la variabilité des protocoles ou des situations non contrôlées lors des études et à l'exception d'une enquête sur la fertilité dans deux troupeaux suédois.

Dans le cas des volailles, il apparaît un effet tératogène des CEM mais avec un effet fenêtre et plutôt aux niveaux intermédiaires d'intensité. Un effet favorable est par contre relevé dans le cas de poulets atteints de coccidiose, ou sur les performances de reproduction pour certaines espèces d'oiseaux seulement, dont la poule reproductrice.

Dans le cas des porcs, les données restent très parcellaires. De rares effets ont été rapportés sur la reproduction et à des niveaux d'exposition (1mT) largement au-dessus de ceux auxquels on peut s'attendre en élevage.

Dans tous les cas, les données de la littérature disponibles sur les animaux de rente ne permettent pas de conclure sur un effet majeur et spécifique des CEM sur les performances et la santé des animaux, en particulier dans des intensités d'exposition inférieure à 100 μ T (valeur limite d'exposition recommandée pour le public pour des CM de 0 Hz à 300 Hz (Conseil de l'Union Européenne 1999)), considérant de plus que les valeurs relevées dans la campagne de mesure sont nettement plus faibles que ce seuil (3 μ T).

4.3 Mécanismes physiologiques

Dans ce chapitre ont été compilées et analysées les données actuelles visant à expliciter comment les CEM-EBF pourraient agir sur les fonctions physiologiques des animaux. Cette analyse a été menée autant que possible sur des animaux d'élevage mais aussi sur d'autres espèces animales.

4.3.1 Effets des champs électromagnétiques sur les rythmes biologiques circadiens

Deux hypothèses se proposent d'expliquer l'action des CEM-EBF par une perturbation des rythmes biologiques :

- La première, dite « hypothèse de la mélatonine », repose sur les propriétés anticancéreuses de cette hormone et sur les observations qui tendaient à montrer une possibilité d'action des CEM sur la sécrétion de mélatonine.
- La seconde hypothèse, dite « des cryptochromes rétinien », repose sur des observations plus récentes démontrant l'interaction des CEM-EBF avec le métabolisme redox (oxydoréduction) des cryptochromes rétinien. En effet, il est établi que ces éléments cellulaires jouent un rôle dans la régulation des rythmes biologiques au niveau du mécanisme moléculaire des horloges.

4.3.1.1 L'hypothèse de la mélatonine

Parmi les multiples actions de la mélatonine, la principale est de transmettre à tout l'organisme la commande générée dans l'horloge centrale circadienne en entraînant et synchronisant les rythmes des diverses activités fonctionnelles de l'organisme, des variations rythmiques cellulaires jusqu'au rythme d'activité locomotrice de l'animal (Boissin et Canguihem 1998; Touitou 2011). Cette action est médiée par le rythme de synthèse-sécrétion qui se caractérise par un « pic » nocturne, plus ou moins étroit selon l'espèce, et une sécrétion faible pendant la phase diurne ; il est à noter qu'un bref épisode lumineux en phase nocturne inhibe la synthèse-sécrétion de l'hormone et peut durablement décaler la poursuite des rythmes sur les jours suivants. Parmi les actions de la mélatonine, on note une action inhibitrice de l'axe hypothalamo-gonadique d'où son rôle clé sur les cycles de reproduction, une action de régulation du système immunitaire et une action potentiellement réductrice sur les risques tumoraux (Di Bella et al. 2013; Vollrath 2001).

En 2006, une revue d'études des effets des CEM-EBF sur la sécrétion de mélatonine (Health Protection Agency, GB) (Swerdlow 2006), concluait à la nécessité de poursuivre les études, en particulier en raison des effets potentiels anti-oxydant et anti-oncogène de la mélatonine (cf paragraphe 4.3.1.2) et du rôle de cette hormone comme facteur de synchronisation des rythmes biologiques au sein de l'organisme. De plus, l'intérêt pratique du suivi de la mélatonine est de fournir un marqueur interne des rythmes à période de 24 h (l'observation des rythmes « externes » d'un organisme suppose pour sa part l'observation des fluctuations rythmiques d'activités comme veille/repos, action/inaction, etc). Ainsi, en ce qui concerne l'effet des CEM-EBF sur les rythmes biologiques, outre ceux de l'activité comportementale, c'est principalement celui de la mélatonine qui a été le plus suivi. Les études menées chez l'humain adulte sont restées de courtes durées (inférieures à 2 semaines) ; mais 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 mélatonine avec une diminution du pic nocturne [cf. revues (Jahandideh et Abdolmaleki 2010; Swerdlow 2006; Touitou et Selmaoui 2012)]. Toutefois les résultats se sont avérés insuffisamment répétables pour valider avec certitude « l'hypothèse

mélatonine » comme agent biologique exclusivement en cause dans les perturbations consécutives à une exposition aux CEM-EBF (Touitou et Selmaoui 2012).

Les données relatives aux effets des CEM sur les rythmes d'activités comportementales des animaux de rente restent parcellaires. Ganskopp *et al.* ne rapportent pas de désorganisation des « patterns comportementaux » (ou patrons) d'activité chez des vaches exposées à la proximité d'une ligne THT de 500 kV (Ganskopp *et al.* 1991). En effet, la répartition sur 24h des différentes activités comportementales (abreuvement, déplacement, alimentation, repos et station debout) n'est pas modifiée, la plus grande proportion du temps étant dévolue au repos. Des données plus récentes font défaut, elles mériteraient pourtant d'être mieux précisées, en particulier dans le cas des animaux de rente.

L'axe corticotrope présente également des variations rythmiques marquées d'activité au cours du nycthémère ; on peut suivre son activité en mesurant les concentrations hormonales circulantes (cortisol et corticostérone). Au moins deux études solides au plan méthodologique, sont disponibles. Elles concernent le mouton (4 μ T, 6 V/m, pendant 6 mois ; Thompson *et al.* 1995) et la souris (0, 25, 50 V/m, 18 h/jour pendant 42 jours ; (Hackman et Graves 1981)). Elles n'ont pas montré de modification du rythme spontané d'activité corticotrope consécutivement à l'exposition à ces CEM.

De nombreuses expériences ont été réalisées pour suivre l'effet des CEM sur les profils de sécrétion de la mélatonine par les animaux (voir l'éventail des espèces et la diversité des études au Tableau 21, Annexe 5). Les travaux les plus détaillés en matière de description des paramètres physiologiques ont été menés sur des rongeurs (rats, souris, hamsters), des primates (babouins) et de manière beaucoup plus limitée sur des espèces de rente. Les données synthétiques fournies au Tableau 21 (Annexe 5) présentent les effets comportementaux de cinq études réalisées chez des bovins laitiers, des truies ou des porcs en croissance, tous obtenus en conditions non standardisées (les effectifs des animaux de chaque étude sont rapportés dans le tableau). Les données du Tableau 21 présentent également les effets comportementaux observés de six études en conditions terrain ou semi-contrôlée chez des bovins (jeunes ou allaitant), des moutons ou des poissons.

Le Tableau 22 traite également des effets sur le comportement mais en situation contrôlée de type laboratoire. Cette synthèse n'est pas totalement exhaustive, mais une comparaison avec le nombre d'études sur animaux de rente montre bien que ces dernières restent plus limitées. Les intensités des champs appliqués sont principalement en dessous de 0,1 mT (100 μ T) avec un maximum de 1 mT, avec des durées d'exposition variant de 15 min à plusieurs mois, voire sur plusieurs générations (Jahandideh et Abdolmaleki 2010; Jahandideh *et al.* 2010). Selon ces études l'indicateur considéré est le niveau de mélatonine circulante, son métabolite le 6-hydroxymélatonin sulfate (6-OHMS) sécrété dans le sang et dans l'urine, ou l'activité de l'enzyme présidant à sa synthèse (N-acétyl-transférase ou NAT).

L'historique des études récentes montre qu'après une première phase de travaux où les effets des CEM « semblaient » avérés, la prise en compte de la complexité physique des facteurs d'exposition a permis de réaliser que les données pouvaient être marquées d'une forte variabilité et souvent d'un manque de répétabilité (méthodes de mesure, variabilités inter-individuelle et inter-espèce, conditions expérimentales : heure, durée, intensité de l'exposition, etc.). Ainsi, est-on passé de la certitude de l'action des CEM-EBF sur les profils de synthèse-sécrétion de mélatonine, à un consensus plus mesuré qui appellerait à reprendre des campagnes de mesure et à vérifier ces effets supposés sur chaque espèce animale d'intérêt. Une telle conclusion est particulièrement

pertinente pour les espèces d'élevage, qui dans cette perspective, restent relativement peu étudiées (Touitou et Selmaoui 2012; Vanderstraeten 2013; Vanderstraeten *et al.* 2012).

En conclusion, compte tenu des incertitudes sur la solidité des résultats obtenus et disponibles lors de la rédaction de ce document sur l'effet des CEM sur les rythmes biologiques, en particulier sur la sécrétion rythmique de mélatonine, il semble nécessaire de :

i) de mieux caractériser (par des mesures de terrain) les paramètres particuliers des CEM-EBF présents sur chaque exploitation. Cet aspect a été initié via une CRD et les résultats obtenus sont présentés dans ce rapport (cf. paragraphe 3.3.2).

ii) de suivre l'expression de plusieurs marqueurs des rythmes quotidiens (sur au moins deux cycles de 24 h consécutifs, pour au moins une activité comportementale et pour le taux de mélatonine plasmatique). Il est peu probable que de telles conditions d'expérimentation puissent être satisfaites en exploitation.

Cette brève revue indique, au moins pour ce qui concerne le modèle des rongeurs :

(i) la réalité, attestée expérimentalement, d'un effet inhibiteur partiel des CEM-EBF sur la sécrétion de mélatonine (l'amplitude du pic nocturne diminuée, phase souvent décalée sur le cycle de 24h). Dans l'absolu, il existe donc potentiellement une perturbation des biorythmes qui pourrait se traduire par des modifications comportementales ou des irrégularités des cycles de reproduction.

(ii) que les effets perturbateurs des biorythmes sont plus solidement étayés dans le cas d'expositions prolongées (≥ 4 semaines), et ceci de manière plus évidente sur de jeunes animaux.

Rappelons que chez l'humain, les études expérimentales de longue durée sont absentes et, pour des raisons éthiques manifestes, aucune étude expérimentale n'a jamais été et ne pourra être pratiquée chez l'enfant.

Ainsi, depuis quelques années, l'hypothèse de la perturbation du rythme de mélatonine n'est plus considérée comme mécanisme pertinent, sans doute du fait de l'absence de tout mécanisme cellulaire formellement établi qui pourrait expliquer un effet direct des CEM-EBF sur les biorythmes.

4.3.1.2 Effets des champs électromagnétiques sur les cryptochromes

L'hypothèse de l'implication des cryptochromes dans la mise en place des réactions suite à une exposition aux CEM-EBF n'est pas basée sur une convergence d'observations (contrairement à l'hypothèse de la mélatonine) mais sur le récent constat de l'influence d'un CM statique de faible intensité, à savoir le champ magnétique terrestre (CMT), sur l'état d'oxydoréduction des cryptochromes et notamment de l'équilibre électronique entre le FAD (flavine adénine dinucléotide) et 3 résidus tryptophane (Trp) à l'intérieur de la molécule. Face à l'absence de lien de causalité démontré pour ce qui concerne les leucémies infantiles, certains auteurs (Bunch *et al.* 2014; IARC 2002; Vanderstraeten et Burda 2012; Zhao *et al.* 2014) ont proposé l'hypothèse selon laquelle les cryptochromes tissulaires pourraient être les maillons par lesquels les CEM-EBF exercent leur éventuelle action.

Les cryptochromes constituent une famille de flavoprotéines sensibles à la lumière bleue qui déclenche une réaction de photoréduction (réduction activée par la lumière) (Biskup *et al.* 2011; Liedvogel et Mouritsen 2010; Wiltschko *et al.* 2011). Le point d'intérêt est que cette réaction de photoréduction présente également une sensibilité à des CM d'intensité aussi faible que quelques

microteslas (le CMT variant de 25 à 65 μ T). Les cryptochromes sont présents dans tout le règne végétal et animal (humain compris). Leur structure et leur métabolisme ont été conservés au cours de l'évolution (Chaves *et al.* 2011). Les cryptochromes appartiennent également à l'ensemble de protéines ubiquistes potentiellement impliquées dans la croissance tumorale et la réparation de l'ADN.

Enfin, les cryptochromes sont désormais connus en tant qu'éléments constitutifs de la machinerie moléculaire de l'horloge circadienne cellulaire (Hastings *et al.* 2014; Ono *et al.* 2013; Pauls *et al.* 2014). Ils sont présents aussi bien dans le système nerveux que dans les tissus périphériques où ils ne sont pas exposés à la lumière. Ils interagissent de manière spécifique avec d'autres composants de l'horloge cellulaire, notamment avec les protéines PER (Period) 1 et 2, BMAL1¹⁷ et CLOCK¹⁸ qui toutes participent à l'expression, au maintien et à la coordination temporelle des multiples rythmes cellulaires, dont ceux de la multiplication cellulaire (Hastings *et al.* 2014; Pauls *et al.* 2014; Sancar 2004). Les cryptochromes des vertébrés sont de type II et de sous-type 1 (CRY1) et 2 (CRY2) (Chaves *et al.* 2011) ; CRY1 paraît responsable de la genèse des biorythmes (Ruan *et al.* 2012) et CRY2 est plus impliqué dans le contrôle de la période de ces rythmes (Anand *et al.* 2013).

Un ensemble de faits convergents, d'ordres physique et expérimental, a conduit à l'hypothèse qu'ils pourraient être impliqués dans la détection du CMT chez un certain nombre d'espèces et que les CEM-EBF ont un impact sur l'état d'oxydoréduction des cryptochromes (Lagroye *et al.* 2011; Maeda *et al.* 2012; Vanderstraeten 2013).

En conclusion, toutes ces données suggèrent :

(i) la modification des biorythmes par les CEM-EBF est une éventualité démontrée expérimentalement sur des cas très spécifiques qui ne concernent pas les espèces dites d'élevage,

(ii) ceci n'exclut pas la possibilité d'une modification du rythme de synthèse et de sécrétion de la mélatonine par des mécanismes cellulaires non encore mis à jour ;

(iii) les perturbations de l'environnement magnétique pourraient avoir un effet sur la fonction de régulation des horloges cellulaires à période de 24 h (i.e. circadienne) par l'intermédiaire d'une action sur les cryptochromes rétinien, qui eux, sont soumis à l'action de la lumière. Dans la ligne des travaux expérimentaux actuellement en cours pour éprouver cette piste de travail, les perturbations de l'environnement magnétique pourraient également concerner les cryptochromes des neurones de l'horloge centrale du cerveau, horloge qui reçoit directement des informations photoniques issues de la rétine (i.e. cycle jour/nuit, éclairages modifiés en élevage). Il s'agirait alors d'une conjonction entre effet direct des CEM et effet de la lumière, qui ferait que ces éléments cellulaires sont les éléments potentiellement clés d'une action des CEM.

¹⁷ BMAL : venant de l'anglais *brain-muscle-like*, protéines agissant comme facteur de transcription au sein du mécanisme de l'horloge circadienne de toutes cellules et en coopération, entre autre, avec la protéine CLOCK. Voir : [Circadian Gene Expression and Clinicopathologic Correlates in Pancreatic Cancer](#)

¹⁸ CLOCK : pour Circadian Locomotor Output Cycles Kaput

4.3.1.3 Conclusions sur l'effet des champs électromagnétiques sur les rythmes biologiques circadiens

Un ensemble de données expérimentales incite à proposer une hypothèse destinée à expliquer le mécanisme de l'action éventuelle des CEM-EBF.

i) L'exposition aux CEM-EBF retentit sur l'intensité globale de l'exposition qui résulte à la fois du CMT et de CEM-EBF fluctuants, ce qui a été considéré comme pouvant affecter la régulation des rythmes biologiques, même sous l'action de champs d'intensité de quelques dizaines de μT . A cet égard, les cryptochromes des cellules rétiniennes sont les candidats actuels les plus étudiés. Dans l'hypothèse de l'existence d'un sens directionnel basé sur les propriétés des cryptochromes rétiniens (l'existence de ce sens est postulée sur la base d'observations comportementales chez certains rongeurs et chez des oiseaux), des oscillations angulaires du CMT pourraient interférer avec le fonctionnement normal de ce sens.

ii) La question non encore élucidée reste de savoir si un tel effet pourrait affecter les fonctions chronobiologiques des cryptochromes et intervenir dans l'association constatée entre exposition prolongée aux CEM-EBF et la leucémie chez le jeune enfant. En l'absence d'explication alternative étayée sur des données expérimentales contrôlées, cette interrogation subsiste.

iii) Au-delà d'une corrélation statistique reconnue entre leucémie aiguë et exposition aux CEM-EBF chez de jeunes individus (voir chap. 4.3.1.2. avec les travaux de Bunch *et al.* 2014; IARC 2002; Vanderstraeten et Burda 2012; Zhao *et al.* 2014 ; et 4.3.3. dont plus particulièrement le 4.3.3.1. avec les études épidémiologiques de Wertheimer et Leeper, 1979 ; Grellier *et al.*, 2014), nous ne disposons que d'hypothèses pour comprendre la chaîne des mécanismes en jeu. La question scientifique fondamentale qui subsiste porte donc sur l'identification du substrat biologique de l'effet des CEM.

Ainsi, après une étape de travail qui a favorisé l'hypothèse dite de la mélatonine, la communauté scientifique continue à favoriser une action sur les rythmes biologiques, la mélatonine n'étant plus l'élément d'interface initial ou princeps. L'évolution des connaissances tend à privilégier le rôle des cryptochromes, éléments reconnus comme moteurs de la machinerie moléculaire des rythmes au sein de la cellule, y compris des rythmes de multiplication cellulaire.

Il reste intéressant de noter que dans ces deux hypothèses (cryptochromes et mélatonine), un élément commun subsiste, celui d'une perturbation des rythmes biologiques à période proche des 24 h.

4.3.2 Effets des champs électromagnétiques sur les canaux ioniques cellulaires, en particulier canaux ioniques des cellules excitables.

Hormis les effets des CEM-EBF sur les rythmes biologiques et sur les cryptochromes, d'autres études ont recherché les effets de ces ondes sur d'autres paramètres physiologiques. Les effets des CEM sur les transports d'ions au travers des membranes ont également été étudiés.

Ces approches concernent avant tout les recherches en biophysique effectuées *in vitro* ; aussi est-il prématuré d'avancer une hypothèse permettant d'établir une corrélation entre l'action d'un CEM, la dynamique d'un canal ionique particulier (K^+ , Na^+ ou Ca^{++}) et la conséquence sur une fonction ou un comportement. En situation d'expérience *in vitro*, les effets des CEM sur les canaux ioniques sont suivis par la technique du « *patch clamp*¹⁹ », exclusivement avec des expositions d'intensité très élevées (1, 5, 10 mT pendant 15 minutes) (Marchionni *et al.* 2006). Avec cette technique, une augmentation de la dynamique des canaux calciques de neurones *in vitro* isolés à partir de moelle épinière de rat a été enregistrée ; la durée d'ouverture des canaux potassiques s'est parallèlement accrue exclusivement sous l'effet d'un CEM permanent à 50 Hz, 125 μT (Li *et al.* 2011).

Plus récemment, les effets combinés d'un champ statique en alternance avec un CEM-EBF de 50 Hz ont été testés sur des canaux potassiques voltage-dépendants (lignées cellulaires de neuroblastomes humains). Le suivi en « *patch clamp* » des courants sortants potassiques avant, pendant et après des expositions à diverses intensités de CEM (26,5 à 101,2 μT), n'a révélé aucune variation significative dans les conditions expérimentales testées (Gavoçi *et al.* 2013).

L'effet des CEM-EBF sur les canaux calciques a été étudié. Liburdy, en 1992, a exposé des thymocytes de jeunes rats à un CEM sinusoïdal de 60 Hz, 22 mT (Liburdy 1992). Il a alors montré que la concentration intracellulaire de calcium et les flux de calcium étaient perturbés dans ces thymocytes.

De même, il a récemment été démontré qu'un CEM de 1 mT, 50 Hz peut déclencher la synthèse de la protéine précoce de croissance (ERG1) dans des cellules souches en culture (mésenchyme humain, hBM-MSCs). Soumises à ce type de CEM, les cellules amorcent leur différenciation en cellules neuronales (Seong *et al.* 2014). Ces données rejoignent des travaux antérieurs (Morgado-Valle *et al.* 1998) ayant analysé l'effet d'une exposition *in vitro* (4 h/jour pendant 7 jours, 0,7 mT, 60 Hz) de cellules chromaffines surrenales de jeunes rats. Dans ce cas, l'exposition augmentait spécifiquement les courants calciques à seuil de déclenchement élevé, une réponse à l'origine de différenciation accélérée et de multiplication des ramifications axoniques pour ce type de cellules *in vitro*.

De manière tout aussi intéressante, l'exposition de rats *in utero* ou pendant la période post-natale à des CEM (1 semaine à 0,3 et 3 mT, 50 Hz), entraîne des augmentations de l'excitabilité des neurones en explants, prélevés en post-natal sur ces animaux (Balassa *et al.* 2013).

En conclusion, les données concernant les effets des CEM sur les canaux ioniques cellulaires, c'est-à-dire sur l'excitabilité des cellules, en particulier des cellules nerveuses et neuro-sécrétrices, proviennent de conditions expérimentales variées et fort différentes des

¹⁹ **Patch-clamp** est un terme anglais désignant une technique électrophysiologique d'enregistrement de l'activité des courants ioniques transitant à travers les membranes cellulaires.

situations rencontrées en élevage. Ceci est valable indépendamment du type cellulaire ou de la catégorie de canal ionique étudié. Le plus souvent ce sont des expositions précoces (tissus prélevés sur des fœtus ou des nouveau-nés) qui tendent à avoir des effets plus marqués vis-à-vis du développement ultérieur des propriétés cellulaires. Cette constatation n'est pas sans rappeler la prévalence des effets d'expositions chez le jeune enfant humain, sans pour autant disposer de preuves validées expérimentalement sur des tissus d'origine humaine.

4.3.3 Effets des champs électromagnétiques sur l'ADN

Il y a maintenant plus de 30 ans, les CEM-EBF ont été reconnus comme des agents capables d'augmenter le risque de leucémie chez l'enfant (Wertheimer et Leeper 1979). Aujourd'hui certains auteurs estiment qu'annuellement, en Europe, au moins une cinquantaine de cas de leucémies chez l'enfant peut être attribuée à ces champs (Grellier *et al.* 2014). Dans la mesure où les liens entre cancer et dommages à l'ADN sont bien établis, il semble pertinent de rechercher l'effet de ces CEM sur la structure de l'ADN.

Des rapports datant des années 2000 avaient abouti à la conclusion que les CEM, à eux seuls, n'étaient que peu ou pas capables de provoquer des dommages à l'ADN (IARC 2002; WHO 2007). Par contre, ces mêmes rapports ainsi qu'une méta-analyse de 2006 (Juutilainen *et al.* 2006) suggéraient que les CEM pouvaient potentialiser les effets d'agents génotoxiques.

4.3.3.1 Les méta-analyses

Depuis que ces documents ont été diffusés, de nouvelles informations ont été publiées. Une revue générale datant de 2008 (et provenant du même groupe que celui ayant réalisé la méta-analyse de 2006) a abouti à des conclusions similaires (Juutilainen 2008) : à savoir que les CEM-EBF ne sont pas génotoxiques par eux-mêmes mais sont capables d'augmenter les effets de certains composés génotoxiques. En 2009, une nouvelle méta-analyse compilait les résultats de 87 études où l'effet génotoxique des CEM-EBF était étudié (Vijayalaxmi et Prihoda 2009). Dans cette méta-analyse plus de 25 types de cellules différentes ont été utilisés, il s'agissait soit de cellules humaines soit de cellules de souris. Les conditions de l'exposition aux champs étaient variables, mais 65 de ces études utilisaient des champs provenant de courant de 50 Hz et le champ magnétique utilisé était le plus souvent de 1 mT. Dans 7 études reprises dans la méta-analyse, les cellules provenaient de personnes exposées à des CEM, du fait de leur activité professionnelle.

Le nombre d'aberrations chromosomiques spontanées est variable selon la lignée cellulaire considérée. Cependant, l'exposition à des CEM de plus de 0,5 mT conduit à une augmentation du nombre de ces aberrations qui ont été observées dans 16,7 % des études mais le plus souvent à des niveaux d'exposition élevée (> 1 mT). L'incidence des micronoyaux, des structures pouvant provenir de fragments de chromosomes acentriques ou de chromosomes entiers dont la migration est bloquée, est augmentée en moyenne dans toutes les études ayant mesuré ce paramètre. Cependant, l'amplitude de cette augmentation (+ 0,31 pour 1000 cellules) est limitée et se trouve dans la fourchette des événements se déroulant de manière spontanée (9 +/- 8 ‰). Le test des

comètes²⁰ utilisé pour identifier des dommages à l'ADN donne des résultats plus confus. Plus de 21 % des études décrivent des comètes dont la queue a une taille augmentée, ce qui suggère que des fragments courts d'ADN sont produits lors d'une exposition aux CEM.

Les conclusions majeures de cette méta-analyse sont :

- (i) que de nombreux biais sont présents dans beaucoup d'études et que ;
- (ii) dans 22 % de ces études, un effet génotoxique des CEM-EBF est observé (46 % sans effet et 32 % non informatives). Depuis cette méta-analyse, de nouvelles publications ont analysé l'effet des CEM-EBF sur la structure de l'ADN (Tableau 23 en Annexe 5).

4.3.3.2 Effets sur des cellules en culture.

L'effet des CEM-EBF sur la structure de l'ADN a été étudié dans des modèles de cultures cellulaires. Sur des fibroblastes humains, l'exposition à des CEM (50 Hz, 1 mT pendant 1 – 24 h, par intermittence) montre l'effet génotoxique de ce CEM avec des anomalies chromosomiques 10 fois plus fréquentes que chez les cellules témoins (Winker *et al.* 2005). Utilisant des cellules HL60 (myélome humain), Wolf *et al.* ont montré que l'exposition de ces cellules à des champs (50 Hz, intensité variable) conduisait à une augmentation des dommages créés à l'ADN (Wolf *et al.* 2005). Sur des cellules de neuroblastome BE(2), l'application d'un CEM de 1 mT (50 Hz, 48 h d'exposition) conduit à une diminution des événements de rétrotransposition²¹. Ce résultat suggère l'influence des champs sur les mécanismes de remodelage du génome. En utilisant des lignées de cellules fibroblastiques 3T3, Lee *et al.* arrivent à la conclusion que les CEM en eux-mêmes sont incapables (jusqu'à des intensités 1 mT pendant 4 h) d'induire des altérations mais peuvent dans certains cas amplifier les effets de produits génotoxiques (Lee *et al.* 2012).

Ainsi, l'essentiel de ces données a été obtenu avec des intensités supérieures à 1 mT, une valeur rarement retrouvée dans des conditions classiques de vie. Une seule étude utilisant des intensités de seulement 100 µT a montré que l'exposition de cellules SHSY5Y (neuroblastome humain) augmentait la toxicité de la ménadione sur ces cellules (Luukkonen *et al.* 2011).

4.3.3.3 Etudes sur animaux

Ces résultats sont confortés par des études *in vivo* sur animaux chez qui les CEM-EBF semblent incapables de provoquer des dommages, à eux seuls (Juutilainen *et al.* 2000). Une étude menée sur des souris a montré que ces animaux, exposés à des CEM de 1 mT, 15 h par jour pendant 7 jours, présentaient au niveau cérébral des lésions de l'ADN identifiables par un test des comètes juste après la fin de l'exposition aux CEM (Mariucci *et al.* 2010). Vingt-quatre heures après l'arrêt de l'exposition aux champs, ces dommages ne sont plus identifiables. Par contre, ni l'expression de l'HSP70 (protéine de stress thermique), ni des changements de comportement n'ont été

²⁰ Le test des comètes ou *Single Cell Gel Electrophoresis* (SCGE) est une technique d'électrophorèse qui permet d'identifier des dommages causés à l'ADN par des agents chimiques génotoxiques, des radiations, des phénomènes physiologiques comme l'apoptose ou par tout autre mécanisme.

²¹ Les rétrotransposons appartiennent à la famille des éléments du génome qui sont capables de se déplacer à l'intérieur d'un chromosome voire parmi les chromosomes. Une diminution de leur activité correspond à une diminution de la dynamique du génome.

observés chez les animaux soumis à un CEM. Cette étude a été complétée plus récemment par Villarini *et al.* avec des conclusions similaires (Villarini *et al.* 2013). L'exposition de souris à des CEM d'intensités variables (de 0,1 à 2 mT, 50 Hz, 15 h/j, 7 jours) conduit à la formation de lésions au niveau de l'ADN mais uniquement aux intensités les plus élevées (> 1mT). De plus, ces lésions ne sont plus observables 24 h après l'exposition.

Borhani a étudié l'effet des CEM-EBF sur des embryons de souris au stade préimplantatoire (50 Hz, 0,5 mT, 4 h/j, 6 j/semaine, 2 semaines) et a observé que l'exposition à des CEM au stade préimplantatoire a des effets négatifs sur la fertilité de la souris et le développement des embryons en augmentant la fragmentation de l'ADN des blastocystes et en diminuant le nombre de blastocystes (Borhani *et al.* 2011).

En étudiant l'effet des CEM sur la fertilisation des ovocytes de souris, Hafizi *et al.* ont décrit que l'exposition à des niveaux élevés (1,3 mT, 5 heures) pourrait avoir un effet bénéfique sur le taux de fécondité des œufs dans cette espèce (Hafizi *et al.* 2014). Même s'il s'agit d'une tendance, ces résultats ne montrent pas d'effet négatif sur la fécondité.

Sur des cellules nerveuses provenant de souris jeunes (4 à 5 semaines), l'exposition de ces neurones à des CEM provoque une augmentation de l'expression de certaines protéines anti-apoptotiques et une diminution de l'expression de protéines pro-apoptotiques. Les champs auraient alors un effet protecteur sur la survie des cellules nerveuses (Podda *et al.* 2013).

4.3.3.4 Conclusions sur les effets des champs électromagnétiques sur L'ADN

En conclusion sur l'effet des CEM-EBF sur l'ADN :

- (i) toutes les études de type revue ou méta-analyse insistent sur le manque d'expériences qui pourraient faire référence dans ce domaine, néanmoins dans 22 % de ces études, un effet génotoxique des CEM-EBF est observé ;**
- (ii) même si tout laisse à penser que les données obtenues sur les effets génotoxiques des CEM-EBF peuvent être transposées d'une espèce de mammifère à une autre, aucune donnée ne concerne les animaux d'élevage ;**
- (iii) L'exposition à des CEM-EBF peut entraîner certaines altérations de l'ADN, de plus, ils semblent capables d'amplifier les effets génotoxiques d'autres composés, notamment chimiques.**

4.3.4 Champs électromagnétiques et stress oxydant

Le stress oxydant (ou stress oxydatif) est un type d'agression des constituants de la cellule dû aux espèces réactives oxygénées (ROS, *reactive oxygen species* en anglais) et aux espèces réactives oxygénées et azotées (RONS, N pour *nitrogen* en anglais) oxydantes. Ces espèces sont, par définition, des radicaux libres. La production de ROS et RONS est normale pour tous les organismes vivant en aérobie et ne constitue pas, en soi, une situation de stress oxydant. En effet, la cellule dispose d'un système complexe de détoxification contre les ROS comprenant des enzymes (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase...) et des petites molécules (vitamine E, vitamine C, oligoéléments,...). La production d'espèces radicalaires devient une situation pathologique dès que le système de protection est submergé par les ROS et les RONS : on parle alors de stress oxydant. Le stress oxydant est un facteur d'inflammation et de mutagenèse mais il est aussi considéré, par certains, comme une des principales causes de

cancer. Il jouerait un rôle dans la maladie d'Alzheimer, comme dans plusieurs affections plus courantes telles que les maladies cardio-vasculaires, les accidents cérébro-vasculaires, l'arthrite rhumatoïde ou les cataractes (Bolisetty et Jaimes 2013).

De nombreuses études ont été menées sur des lignées cellulaires avec des résultats divers. Par exemple, Falone *et al.* montrent que l'exposition de cellules de neuroblastome (lignée SH-SY5Y) à un champ d'intensité élevée de 1 mT, 50 Hz pendant 96 h oriente l'environnement cellulaire vers l'état réduit, sans modifier la prolifération cellulaire, mais avec une augmentation de la différenciation cellulaire (Falone *et al.* 2007). Par contre, Mannerling *et al.* ont exposé des cellules leucémiques d'origine humaine (lignée K562) à des champs de 50 Hz d'intensité relativement faible de 0,025 à 0,1 mT pendant une heure. La prolifération cellulaire n'est pas modifiée mais les auteurs montrent une augmentation des radicaux oxygénés et de la protéine de stress thermique HSP70, augmentation antagonisée par des inhibiteurs radicalaires comme la mélatonine (Mannerling *et al.* 2010). Hong *et al.* ont exposé la lignée MCF10A de cellules épithéliales mammaires humaines à un champ de 60 Hz, 1 mT pendant 4 h. Ils n'ont mis en évidence aucune modification des paramètres représentatifs du stress oxydant, contrairement à l'effet de rayonnements ionisants gamma utilisés comme contrôle positif (Hong *et al.* 2012). Luukkonen *et al.* ont exposé des cellules SH-SY5Y, à 100 μ T pendant 24 h. Ils montrent une augmentation significative de la production de ROS et de la formation de micronoyaux (instabilité génomique) mais cette augmentation est quantitativement très faible et les auteurs questionnent la signification fonctionnelle de ces résultats (Luukkonen *et al.* 2014). Sur des cultures de cellules du cortex embryonnaire de rat, exposées pendant 7 jours à un champ de 50 Hz, Di Loreto *et al.* n'ont mis en évidence aucun effet pour l'intensité de champ la plus faible (0,1 mT) et pour un champ d'intensité élevé (1 mT), ils ont montré une augmentation de la viabilité des cellules qui s'accompagnait d'une augmentation de l'expression du facteur de croissance neuronale (BDNF) et de son récepteur TrkB (Di Loreto *et al.* 2009). Les marqueurs de l'activité redox cellulaire n'ont pas été modifiés. Ces quelques exemples de travaux sur cultures de cellules montrent une grande diversité de conditions expérimentales (type cellulaire, intensité du CEM et durée d'exposition) et de résultats. Ils n'apportent aucun argument convaincant pour une augmentation du stress oxydant dans les cellules soumises à un CEM-EBF.

Plusieurs études ont recherché l'effet de l'exposition *in vivo* (rats et souris) à des CEM-EBF sur le stress oxydant dans divers tissus. Dans un article de synthèse récent, Consales *et al.* ont recensé les travaux réalisés (Consales *et al.* 2012). La plupart des études montrent un effet pro-oxydant des CEM, le plus souvent dans des conditions élevées d'exposition en intensité (100 μ T à 7 mT) et/ou en durée (quelques heures à plusieurs mois). Une de ces études est cependant à remarquer. Suite à une exposition de faible intensité (50 mG soit 5 μ T pendant 5 min tous les deux jours) mais prolongée (6 mois), une forte augmentation de l'état d'oxydation a été observée dans le cerveau et le plasma de rats, et ces modifications ont été annulées par un traitement chronique au sulfate de zinc (Bediz *et al.* 2006). Dans une étude récente chez la gerbille, Selakovic *et al.* montrent que les concentrations des espèces réactives oxygénées augmentent dans le cerveau de façon intensité-dépendante après sept jours d'exposition à des champs (50 Hz) de 0,1 à 0,5 mT (Selaković *et al.* 2013). Ces effets sont fortement atténués trois jours après la fin de l'exposition. Ils sont plus marqués chez des animaux d'âge moyen (10 mois) que chez des adultes jeunes (3 mois). Goraca *et al.* ont exposé des rats Wistar mâles à un champ très élevé tel qu'utilisé en magnétothérapie (40 Hz, 7 mT, 30 min/j pendant 14 jours). Ils ont montré une diminution des capacités oxydantes du plasma et du tissu cardiaque devenant significative lorsque la durée d'exposition est portée à 60 min/j (Goraca *et al.* 2010).

Conclusion quant aux effets des CEM-EBF sur le stress oxydant.

Même si le débat n'est pas clos, plusieurs études ont suggéré que l'effet des CEM sur la structure de l'ADN pouvait être lié à une altération des capacités de lutte de l'organisme vis-à-vis des radicaux libres (voir paragraphe 4.3.3). Des études *in vivo*, chez l'animal entier ou *in vitro* sur des cultures de cellules ont en effet montré une diminution de la tolérance des animaux et des cellules au stress oxydant après contact avec un CEM. Dans la mesure où le stress oxydant est bien connu pour induire les altérations dans la structure du génome (Kryston *et al.* 2011), les champs pourraient, par cet intermédiaire qu'est le stress oxydant, induire des mutations de l'ADN.

La signification fonctionnelle de ces effets montrés à des niveaux d'exposition très élevés reste à prouver en conditions réelles d'exposition, en particulier chez les animaux domestiques pour lesquels aucune donnée n'est disponible.

4.3.5 Champs électromagnétiques et immunité

Les données récentes sur les effets des CEM-EBF sur l'immunité sont assez restreintes. Il y a de plus une grande variété de modèles expérimentaux, *in vitro* et *in vivo*, relatifs à l'intensité du CEM et à la durée d'exposition, ou relatifs au choix des paramètres immunitaires étudiés (immunoglobulines, réponse inflammatoire, etc.). Beaucoup d'études récentes ont été probablement engagées suite aux conclusions de rapports collectifs, tels que celui de 2006 par Santé Canada (Québec 2006), qui mentionne la possibilité d'un faible risque de cancer, principalement de leucémie chez l'enfant, sans que le lien de cause à effet ne soit démontré.

Sachant que deux rapports collectifs ont été produits en 2010 sur les effets potentiels des CEM sur la santé humaine, par l'Afsset (Afsset 2010) puis par le parlement Français (Raoul 2010), les études mentionnées ci-après datent pour l'essentiel de moins de 10 ans. Elles se concentrent sur les effets possibles des CEM sur l'immunité chez l'animal ou l'humain. Compte tenu de la variété des modèles expérimentaux, deux sous-groupes ont été constitués : les modèles *in vitro* et *in vivo* (voir le récapitulatif des références utilisées Tableau 24, Annexe 5).

4.3.5.1 Etudes *in vitro*

Pour de nombreuses études, l'immunité a été analysée simplement sous l'angle de la réponse inflammatoire, sur des modèles de cellules du sang ou issues de lignées « leucémiques ». Certains auteurs ont observé une stimulation de la réponse immunitaire. Selon Cuppen *et al.* les CEM agissent sur les cellules immunitaires comme des pathogènes (Cuppen *et al.* 2007). Ainsi l'application pendant 30 minutes par jour d'un champ de 3 nT à 50 µT avec une fréquence de 250 à 5 000 Hz sur des leucocytes de carpe entraîne une stimulation immunitaire. Ainsi, Akan *et al.* observent une activation phagocytaire et une réduction de la croissance de pathogène, dans des cultures cellulaires soumises à un CEM de 1 mT (50 Hz) pendant 4 à 6 h (Akan *et al.* 2010). Frahm *et al.* observent sur des cultures de macrophages soumis à un CEM de 1 mT, avec 2 durées d'exposition (45 min ou 24 h), une activation phagocytaire accompagnée d'une forte hausse de la production d'une cytokine (l'interleukine IL1-beta) pour une exposition longue (Frahm *et al.* 2006). Ces auteurs observent aussi pour des CEM de 0,05 à 1 mT une hausse de la formation de

radicaux libres qui est associée à la dernière étape de la différenciation des macrophages (Frahm *et al.* 2010).

Cuppen *et al.* ont travaillé sur des leucocytes de carpe et ont proposé une hypothèse expliquant la stimulation du système immunitaire via un processus d'autostimulation. L'exposition à un CEM induirait un stress des cellules immunitaires qui produiraient alors des signaux de danger (cytokines) qui activeraient les macrophages. Lorsque cela se produit, les macrophages produisent à leur tour des cytokines (Cuppen *et al.* 2007). Il y aurait donc une stimulation de la réponse immunitaire par les CEM dans ces modèles *in vitro*, et ces auteurs suggèrent même que sous certaines conditions les CEM pourraient être employés comme des outils thérapeutiques. Cette hypothèse audacieuse rejoint les conclusions de Simko et Mattson. Ces deux auteurs présentent l'hypothèse que les CEM (surtout si exposition longue) augmenteraient la formation de radicaux libres et donc stimuleraient l'activation de certaines cellules du système immunitaire (Simkó et Mattsson 2004).

En revanche, dans un modèle cellulaire où l'exposition est plus courte (30 min) mais avec des CEM plus intenses (3 ou 5 mT), De Kleijn *et al.* n'observent pas de modification de la réponse inflammatoire (cytokines pro-inflammatoires) de cellules mononucléaires du sang périphérique humain stimulées par le lipopolysaccharide bactérien (LPS) (de Kleijn *et al.* 2011). Les auteurs suggèrent, pour ce modèle, que la réponse immunitaire innée ne serait pas modulée *in vitro* par les CEM.

4.3.5.2 Etudes *in vivo*

L'essentiel des études a été réalisé chez les animaux de laboratoire (rat, souris, cobaye). Une des premières études sur ce sujet a été produite par Parreno *et al.* en utilisant des souris soumises à un CEM d'1,5 mT pendant 8 h/j et 10 jours consécutifs (Parreno *et al.* 1984). Un seul paramètre de l'immunité a été analysé, la concentration en immunoglobulines qui baisse de 25 % chez les animaux exposés. Ces résultats très préliminaires concluaient à une possibilité de réduction de la réponse immunitaire sous l'action d'un CEM. L'étude de Knezevic utilise des lignées de souris porteuses de tumeurs cancéreuses (modèle de leucémie de l'enfant) et indique que l'exposition de ces souris à un CEM de 70 à 120 μ T entraînerait une moins bonne réponse immunitaire *via* une diminution du nombre de lymphocytes (Knezević 2005). Ce même paramètre a été analysé dans les 2 études de Beck *et al.* qui mentionnent aussi des baisses de concentrations en lymphocytes, mais également des hausses de concentration en cytokines proinflammatoires pour les groupes de rats soumis à un CEM de 0,06 à 0,14 mT pendant 3 ou 6 jours, 8 min/j (Beck *et al.* 2006; Beck *et al.* 2007). Pour les expositions aux intensités les plus élevées les auteurs détectent une baisse du nombre de leucocytes et de lymphocytes CD45RA+. Pour Canseven *et al.* la réduction de l'activité cytotoxique des lymphocytes NK (*natural killer*) chez le cobaye soumis à un CEM de 2 mT indiquerait une réduction de la fonction immunitaire (Canseven *et al.* 2006).

En revanche, l'étude récente de Salehi *et al.* n'indique pas d'effet significatif d'une exposition longue (2 h/j pendant 3 mois) à un CEM d'intensité modérée (100 μ T) sur la réponse inflammatoire (cytokines circulantes) du rat (Salehi *et al.* 2013). Enfin, la synthèse de Fernie et Reynolds rapporte pour les oiseaux une absence d'effet constant et clair des CEM sur les différentes fonctions physiologiques dont l'immunité (Fernie et Reynolds 2005).

Cuppen *et al.* ont mené une étude sur le poisson rouge fortement contaminé par des parasites externes et soumis à un CEM de 0,15 à 50 μ T, de fréquence allant de 250 à 5 000 Hz, d'une durée de 30 minutes, plusieurs fois par jour. Ils ont montré que l'exposition aux CEM diminuait la

mortalité des poissons d'autant plus que l'intensité du CEM était élevée, suggérant que les CEM réduiraient le pouvoir pathogène du parasite (Cuppen *et al.* 2007).

C'est chez l'humain que le système immunitaire a été le plus étudié. Deux études relativement récentes comparent des cohortes de personnes qui pour des raisons professionnelles sont exposées à des CEM sur de longues durées. Ainsi, l'étude de Bonhomme-Faivre *et al.* a comparé une petite cohorte de 12 hommes (6 traités + 6 témoins) exposés à de faibles CEM (0,2 à 6,6 μ T), mais sur une longue durée (8 h/j sur 5 ans, travail proche de transformateurs et câbles HT) (Bonhomme-Faivre *et al.* 2003). Seuls quelques paramètres de l'immunité ont été mesurés, tels que la concentration en lymphocytes. Ainsi la concentration en lymphocytes CD4 et CD3 est réduite chez les sujets exposés aux CEM, tandis que la concentration en lymphocytes NK est augmentée. Bonhomme-Faivre *et al.* indiquent aussi que des rats soumis à une exposition chronique (0,2 à 6,6 μ T pendant 109 j) présentent des concentrations réduites en lymphocytes totaux et en lymphocytes CD4+.

Sur une cohorte plus nombreuse, 121 hommes, exposés longuement à divers CEM (0,2 μ T à 1 mT) dans le cadre professionnel, l'équipe de Gobba *et al.* a réalisé plusieurs mesures de paramètres sanguins liés à l'immunité. Pour les 26 sujets soumis à une exposition supérieure à 0,2 μ T, une tendance ($P < 0,10$) à la baisse de l'activité des lymphocytes NK est observée. Pour les 12 sujets soumis à une très haute exposition (> 1 mT), il est détecté une baisse significative de l'activité des lymphocytes NK. Les auteurs suggèrent une baisse de la réponse immunitaire lors d'exposition chronique à des CEM (Gobba *et al.* 2009).

4.3.5.3 Conclusions sur les effets des champs électromagnétiques sur l'immunité

En conclusion :

- (i) Les effets rapportés des CEM-EBF sont le plus souvent une diminution du nombre de lymphocytes, une diminution de la prolifération des cellules T ou NK ou une incidence sur la sécrétion de cytokines. Mais d'autres études ne parviennent pas à mettre en évidence un effet des CEM-EBF.**
- (ii) L'interprétation des études immunologiques est difficile dans la mesure où elles présentent de grandes variations dans l'exposition et l'environnement d'expérimentation.**
- (iii) En accord avec le rapport de l'Afsset (Afsset 2010), le problème majeur de ces études est la faible taille des échantillons (nombre de sujets) pour permettre de conclure quant à l'influence des CEM-EBF sur les systèmes immunitaire et hématologique.**
- (iv) Les données disponibles sont peu homogènes et ne conduisent pas à un faisceau de preuves suffisantes pour conclure sur la présence certaine d'un effet des CEM sur le système immunitaire.**
- (v) En perspective, il faudrait développer des recherches sur les mécanismes (radicaux libres, etc.) et les conséquences de l'exposition à un CEM-EBF sur le développement des systèmes immunitaires et hématopoïétiques chez le jeune animal. Par exemple, il faudrait engager des études sur les relations entre CEM et stress oxydatif cellulaire et sur les voies d'activation de la réponse inflammatoire, ainsi que le suggèrent Mattsson et Simko (Mattsson et Simkó 2012). De même, il est évident que des modèles expérimentaux réalistes reproduisant des expositions longues à des CEM sont nécessaires. Et de manière générale, ces études devraient mieux standardiser leurs modèles expérimentaux.**

4.3.6 Champs électromagnétiques et stress physiologique

Le « stress » est un terme générique utilisé pour décrire la réponse généralisée, non spécifique, à tous les types de défis lorsque ceux-ci mettent en cause l'intégrité de l'organisme ou représentent une menace pour l'animal. Cette réponse comporte des aspects psychiques (émotions négatives, dont la peur), des expressions comportementales (« la fuite ou la lutte » ou la dépression) et biologiques (Dantzer et Mormède 1983).

Les modifications comportementales le plus souvent attribuées à un état de stress prolongé sont de type « anxiété » ou « dépression » (voir paragraphe 4.1). Au plan biologique, les réponses de stress s'apprécient par les variations observées au niveau des deux principaux systèmes neuroendocriniens mis en jeu, l'axe corticotrope et le système nerveux autonome, ainsi que par les modifications physiologiques qu'ils induisent, en particulier métaboliques, cardiovasculaires et immunitaires. Dans une récente revue de la littérature, Touitou et Selmaoui recensent sept articles ne rapportant pas d'effet des CEM-EBF sur les hormones de stress chez les animaux domestiques (bovins, ovins, lapins) et les rongeurs de laboratoire, et sept articles rapportant des effets divers (Touitou et Selmaoui 2012). Quelques articles supplémentaires ont été publiés depuis cette date, relatant des résultats obtenus chez les animaux de laboratoire (Tableau 25 en Annexe 5).

4.3.6.1 Chez les mammifères domestiques

Chez les mammifères domestiques, porcs et ruminants, la glande surrénale, effecteur de l'axe corticotrope, sécrète du cortisol. Chez le lapin, cortisol et corticostérone sont présents. Les trois études disponibles (agneaux, bovins et lapins) n'ont pas montré d'effet des CEM sur les paramètres influencés par le stress.

Portet *et al.* ont réalisé une importante étude chez des lapins soumis à un CE intense de 50 kV/m pendant 18 h/j au cours des deux dernières semaines de gestation et/ou des six premières semaines de vie. Les animaux sont euthanasiés à six semaines. Le poids des animaux et de leurs organes internes, la composition chimique du foie et du tissu adipeux brun n'ont pas été modifiés. Les métabolites circulants mesurés (glucose, triglycérides, cholestérol) ne différaient pas selon les groupes, ni les hormones circulantes (T3, T4, GH, ACTH, insuline, cortisol et corticostérone). Les quelques différences significatives ne sont pas plus nombreuses que le risque accepté pour les tests statistiques (5 %) (Portet *et al.* 1984).

Dans l'étude de Thompson *et al.* menée en Orégon (Etats Unis), des agnelles ont été maintenues entre 2 à 8 mois d'âge sous une ligne THT (60 Hz, 500 kV) générant un CE moyen de 6 kV/m et un CM moyen de 40 mG (4 μ T), et un groupe contrôle dans des conditions identiques, mais à 229 m de la ligne (< 10 V/m et < 0,3 mG ou 0,03 μ T). Une étude détaillée des concentrations circulantes de cortisol pendant plusieurs nycthémères tout au long de l'expérimentation n'a montré aucune modification des concentrations plasmatiques du cortisol ni du cycle nycthéral. Aucune modification de la croissance pondérale ou de la pousse de la laine n'a pu être mise en évidence (Thompson *et al.* 1995).

Dans l'étude de Burchard *et al.* menée au Canada en association avec Hydro-Québec, des vaches laitières en production de race Holstein ont été placées dans un environnement expérimental très bien contrôlé les exposant pendant des périodes de 28 jours consécutifs à un CM horizontal de 30 μ T et un CE vertical de 10 kV/m, équivalents au séjour sous une ligne de 735 kV ou sans exposition pendant les périodes de contrôle (voir paragraphe 4.3.1.1). Les concentrations plasmatiques de cortisol n'ont pas varié (Burchard *et al.* 1996).

4.3.6.2 Chez l'humain

Chez l'humain, les six études citées par Touitou et Selmaoui n'ont pas montré de variation des concentrations circulantes de cortisol dans des conditions d'exposition brève (1 h à 9 h, de jour ou de nuit) et d'intensité maximale de 9 kV/m et 80 μ T (Touitou et Selmaoui 2012).

4.3.6.3 Chez les rongeurs de laboratoire

Chez les rongeurs de laboratoire, le cortex surrénalien sécrète de la corticostérone. Il faut noter que l'étude des facteurs de stress est difficile car les manipulations des animaux et prises de sang sont elles-mêmes sources de stress et peuvent donc interférer avec les facteurs étudiés. Dans plusieurs cas, les travaux concluant à un effet des CEM-EBF présentent des biais méthodologiques qui affaiblissent les conclusions des auteurs (Anselmo *et al.* 2009; Anselmo *et al.* 2006; Anselmo *et al.* 2008; Bonhomme-Faivre *et al.* 1998; Debruyne et Dejager 1994; Harakawa *et al.* 2004; Marino *et al.* 2001).

Hackman et Graves ont exposé des souris mâles à un champ électrostatique de 25 ou 50 kV/m sans composante magnétique. Une augmentation transitoire (pic à 5 min) de la corticostéronémie est observée lors de la mise sous tension du dispositif de production du CE, mais la réponse reste très inférieure à ce qui est mesuré lors de « stress » de contrôle (mélange et transport des animaux, exposition au bruit) (Hackman et Graves 1981). Avec des durées intermédiaires d'exposition (0,5 ; 2 ; 48 et 96 h), une légère augmentation significative a été observée à 48 h, mais avec des valeurs mesurées qui restent faibles par rapport aux valeurs mesurées lors de stress aigu. Dans une troisième expérience à plus long terme (14, 28 et 42 j), les auteurs ont pu mettre en évidence le cycle nyctéméral de la corticostéronémie, sans aucune influence du champ électrique.

Mostafa *et al.* ont exposé des rats Wistar mâles à un CEM élevé (200 μ T, 50 Hz) pendant 1 à 4 semaines. Ils ont observé une diminution progressive des capacités mnésiques (test de discrimination, voir paragraphe 4.1.3.2) et une augmentation des concentrations circulantes de corticostérone (Mostafa *et al.* 2002). Szemerszky *et al.* ont exposé des rats mâles adultes à un CM (0,5 mT, 50 Hz) pendant des périodes brèves (8 h par jour pendant 5 j) ou prolongées (24 h par jour pendant 4 à 6 sem). Aucun effet n'a été mesuré sur les signes classiques du stress chronique, poids des animaux, poids du thymus ou des glandes surrénales (Szemerszky *et al.* 2010). Le seul effet biologique à signaler est une augmentation du contenu de l'antéhypophyse en ARN messager codant la POMC (pro-opiomélanocortine), précurseur de l'ACTH (adrénocorticotrophine), mais les concentrations circulantes d'ACTH et de corticostérone n'étant pas modifiées, ni à l'état de base, ni en réponse à l'exposition à un environnement nouveau, ces résultats sont difficiles à interpréter. L'évaluation de la réactivité émotionnelle de ces animaux a également montré une augmentation de l'immobilité chez les animaux exposés de façon chronique au CEM dans le test de nage forcée. Ces résultats sont généralement interprétés comme reflétant une tendance dépressive. Par contre aucune modification comportementale n'a été observée dans le test du labyrinthe en croix surélevé qui teste les tendances anxieuses.

Kitaoka *et al.* ont exposé des souris mâles à un CM de 1,5 mT, 60 Hz, 8h par jour pendant 25 jours. Une batterie des tests de réactivité comportementale a montré un comportement plus « anxieux » dans la boîte noire et blanche, mais pas de différence en *open-field* et en labyrinthe en croix surélevé, et un comportement plus passif dans le test de nage forcée (Kitaoka *et al.* 2013a). Au plan biologique, les concentrations circulantes de corticostérone, mais pas d'ACTH, ont été

augmentées, parallèlement à une diminution de l'expression d'une enzyme de synthèse des androgènes dans les glandes surrénales (Cyp17a1). D'autres auteurs ont par ailleurs montré une diminution de la concentration plasmatique en testostérone et des fonctions sexuelles mâles chez des rats exposés à un champ de 25 μ T (50 Hz) pendant 18 semaines (Al-Akhras *et al.* 2006). Dans une autre expérience, Kitaoka a montré chez des souris mâles soumises à la même exposition une augmentation de la pression artérielle sans modification de la fréquence cardiaque, et une augmentation des concentrations circulantes de corticostérone et aldostérone sans augmentation de l'ACTH (Kitaoka 2013). Ces résultats suggèrent que la glande surrénale est plus sensible à l'ACTH chez les animaux exposés. De fait, le même auteur a montré que des cellules surrénales tumorales Y-1 exposées à un champ de 3 mT (ou 1,5 mT, voir l'erratum dans Bioelectromagnetics (Kitaoka *et al.* 2013b)) réduisaient leur sécrétion de corticostérone et d'aldostérone pendant les 12 premières heures d'exposition mais augmentaient ensuite leur production (à 24 et 48 h). Une augmentation de l'expression des gènes codant les enzymes de synthèse (Cyp11a1 et Cyp11b32) a été également mesurée à 24 h d'exposition. Les mécanismes de cet effet direct du CEM sur les cellules surrénales restent à explorer. On peut cependant noter que ces effets ont été obtenus à un niveau d'exposition élevé. Dans le résumé d'un article en russe, Alabovskii *et al.* rapportent les résultats d'expériences dans lesquelles ils ont exposé des rats (N = 200) pendant 30 min à des CEM (20 et 53 Hz) de 0,4 à 6 mT générés par un appareil (Mini-Expert-T) utilisé dans un but thérapeutique (magnétothérapie) (Alabovskii *et al.* 2013). L'application du CEM dans la région des surrénales augmente les niveaux de corticostérone de façon non-linéaire avec l'intensité du champ.

4.3.6.4 Conclusion sur les champs électromagnétiques et le stress physiologique

En conclusion de cette partie sur l'éventuelle induction d'un état de stress physiologique par les CEM, on peut voir que :

- (ii) chez les animaux domestiques, trois études (lapins, agneaux et vaches) bien menées, avec des niveaux d'exposition faible à moyen, n'ont pas montré d'effet des CEM-EBF.**
- (ii) chez la souris, une étude bien menée, a également obtenu des résultats négatifs dans un CE atteignant jusque 50 kV/m et une exposition chronique pendant 42 jours.**
- (iii) A des niveaux élevés de CM (200 μ T à 1,5 mT), divers effets ont pu être décrits chez le rat et la souris, en particulier une augmentation de la concentration en corticostérone plasmatique, qui pourrait résulter d'une stimulation directe du cortex surrénalien. Cette hypothèse reste à confirmer.**

4.3.7 Conclusion sur les mécanismes physiologiques

(i) Au plan physiologique plusieurs études ont montré un changement du rythme circadien induit par les CEM-EBF avec dans certains modèles une altération des profils de sécrétion de la mélatonine. A ce sujet une interaction des CEM-EBF avec le fonctionnement des cryptochromes n'est pas à exclure.

(ii) Toutes espèces confondues, les CEM-EBF semblent avoir un effet génotoxique et surtout leur présence semble être capable d'amplifier les effets génotoxiques d'autres composés, notamment chimiques.

(iii) Par ailleurs, les CEM-EBF semblent augmenter les effets d'un stress oxydant, ce qui pourrait expliquer l'effet de ces ondes sur l'ADN.

(iiii) Par contre, toutes les tentatives visant à relier les CEM-EBF à des dysfonctionnements du système immunitaire et au stress physiologique sont restées infructueuses.

5 Conclusions du groupe de travail

L'Anses a été saisie en février 2013, pour une demande d'approfondissement de l'expertise scientifique relative aux conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences (CEM-EBF) sur la santé animale et les performances zootechniques. Cette saisine fait suite à la saisine : « synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences », pour laquelle un avis a été rendu le 6 avril 2010 (Afsset 2010).

5.1 Périmètre de la saisine

Le manque de données bibliographiques sur l'évaluation de l'exposition des animaux d'élevage aux CEM-EBF a amené l'Anses à initier une campagne de mesures des champs électriques et magnétiques dans l'environnement d'un échantillon d'une trentaine de fermes d'élevage, à proximité ou non des lignes à haute tension. Cette première étude, même si elle n'est pas représentative de toutes les situations des fermes en France, a permis de tirer des premières conclusions sur le niveau moyen des champs rencontrés dans l'environnement typique des fermes en identifiant surtout les sources de ces champs. Les champs magnétiques mesurés sous les lignes de transport d'électricité à haute tension restent de faible intensité (entre 0,01 et 7,59 μT) et les champs électriques sont de l'ordre de 46 à 5 060 kV/m. Ces champs sont de plus faible intensité dans les bâtiments d'élevage (< 3 μT et 43 V/m). Les sources internes aux élevages peuvent générer des champs qui atteignent 25 μT à proximité de certains équipements (notamment les armoires électriques), mais les animaux n'y sont pas directement exposés. Pour mémoire, 100 μT est la valeur limite d'exposition recommandée pour le public pour des CM de 0 Hz à 300 Hz (Conseil de l'Union Européenne 1999). Le groupe de travail (GT) recommande la poursuite des études d'évaluation de l'exposition des animaux d'élevage pour tenir compte de la variété des configurations et des environnements rencontrés sur le terrain. Un soin particulier doit être apporté dans le protocole mis en place pour effectuer les mesures et dans le choix des appareils de mesures à utiliser.

Il est important que les mesures de ces champs et de l'exposition des animaux à ces champs soient mieux documentées (métrologie, caractérisation de la source) dans les publications traitant des effets biologiques des CEM. En effet, très peu de publications rendent compte de façon détaillée des moyens de génération et de mesure des CEM alors que la connaissance précise des niveaux de champs appliqués, assortie de son incertitude est extrêmement importante. Le GT recommande de mieux préciser ces éléments dans les futures publications afin de permettre des comparaisons entre études tout en s'assurant de la rigueur scientifique des protocoles de mesure employés et de la conformité de l'instrumentation utilisée à travers la vérification ou l'étalonnage systématique des appareils de mesure. Il conviendra également de mieux apprécier le niveau réel d'exposition des animaux aux sources de CEM-EBF en raison de l'extrême variabilité des paramètres de cette exposition (intensité, durée).

Compte tenu de la configuration, des dimensions particulières et des matériaux des bâtiments d'élevages (importance des structures métalliques), les CEM peuvent être en outre à l'origine de tensions et de courants parasites qui vont circuler dans les éléments métalliques accessibles aux animaux. Ces courants parasites seront d'autant plus importants que les règles en termes de conformité électrique des bâtiments ne sont pas respectées lors de la construction ou modifiées,

suite à une dégradation dans le temps. Il est donc important de connaître, par la mesure ou la simulation, les niveaux de ces courants et tensions parasites, qui peuvent être générés par la proximité des lignes HT ou THT ; mais il est nécessaire également de rendre conformes les bâtiments d'élevage aux normes électriques et de s'assurer d'une mise à la terre efficace des installations et annuler ainsi les effets de ces courants et tensions parasites.

Les connaissances du niveau d'exposition des animaux aux courants parasites sont à ce jour extrêmement limitées. La sensibilité des animaux à ces courants est clairement démontrée en situation expérimentale, mais leur impact sur le niveau de performance et l'état sanitaire des animaux (mammites chez la vache laitière par exemple) dans le contexte multifactoriel des élevages reste mal connu. Comme pour l'étude de l'exposition aux CEM, il est important que les mesures expérimentales de ces courants et de l'exposition des animaux soient bien documentées.

5.2 Les protocoles d'étude

On rencontre une très grande diversité d'expérimentations et de résultats, avec un manque de standardisation de protocoles de référence et de méta-analyses. De ce fait, les conclusions sont très difficiles à tirer.

Les études sur les animaux d'élevage restent peu nombreuses.

- Les études épidémiologiques à grande échelle, qui permettraient de mettre en évidence les effets éventuels des CEM-EBF d'origine externe (lignes haute tension par exemple) et internes (équipements électriques) sur les caractères de production, de santé et de bien-être des animaux d'élevage, sont inexistantes. Il en est de même pour les courants parasites en général et ceux éventuellement générés par les CEM-EBF en particulier.
- Les résultats des études de cas menées dans les exploitations à problèmes, à proximité des lignes HT/THT, sont difficiles à interpréter en raison de l'absence de situation de référence.
- Quelques études expérimentales ont été menées, en particulier en Amérique du Nord, à des niveaux d'exposition aux CEM que l'on peut rencontrer en élevage. Les quelques effets obtenus sont de faible importance et n'ont pas été observés dans toutes les études.

Les expérimentations sur des espèces modèles (souris, etc.) se caractérisent aussi par une extrême diversité :

- des types de modèle étudiés : modèles *in vitro* sur cultures de cellules explantées ou lignées établies, modèles *in ovo* (poule) sur le développement embryonnaire, modèle *in vivo* essentiellement chez les rongeurs de laboratoire à différents stades de développement ;
- des hypothèses et plans expérimentaux ainsi que des mesures effectuées ;
- des caractéristiques des champs appliqués, champ électrique ou magnétique seul, ou champ électromagnétique, le plus souvent à 50 ou 60 Hz dans une très large gamme d'intensité, mais souvent très élevée en particulier pour le champ magnétique alternatif (> 100 μ T) ou pulsé à fréquences diverses ;
- de la durée d'exposition et du nombre d'occurrences.

La pertinence des conditions expérimentales est rarement argumentée, en particulier par rapport aux niveaux d'exposition mesurés sur le terrain, et peu d'études montrent des relations dose (intensité, temps, ...) – effet. On peut cependant signaler, dans les études sur le développement

embryonnaire du poussin, la description d'un « effet fenêtre », pour lequel les CEM influencent le processus étudié dans une fourchette bien précise de fréquence et d'intensité. Il serait important de mieux systématiser les études (conditions expérimentales, paramètres, etc.) et d'argumenter les choix techniques. On peut rappeler ici l'importance de la qualité de la mesure des champs appliqués pendant toute l'expérience.

Quelques pistes de recherche peuvent être mentionnées ici : distinction des effets des champs électrique, magnétique et de leur combinaison, rôle des courants parasites, étude des relations dose-effet avec recherche de seuils faibles et d'un éventuel « effet-fenêtre », observations dans la durée pour analyser la cinétique des effets et rechercher des effets sur le long terme, étude des effets sur le jeune animal et pendant son développement pour rechercher des sensibilités particulières (cf. leucémie chez l'enfant).

5.3 La mesure des effets

Les conséquences physiologiques des CEM-EBF n'ont pas été 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. Une difficulté majeure est l'absence d'hypothèse sur les mécanismes d'action des CEM-EBF sur les organismes.

5.3.1 Le comportement et les effets neurobiologiques

Peu d'informations sont disponibles sur la perception du CM par les animaux et son utilisation (orientation des déplacements par exemple) et on ignore si les CEM influencent la perception et l'utilisation du champ magnétique terrestre.

Il n'y a pas d'effet manifeste des CEM-EBF sur le comportement des animaux d'élevage bien que les données soient limitées. Il n'a pas été mis en évidence de réponse non spécifique de stress.

Chez les rongeurs, il a été observé dans certaines études une dégradation des fonctions cognitives (apprentissage et mémorisation) à des niveaux d'exposition supérieurs à 100 μ T.

5.3.2 Les performances zootechniques et sanitaires

Chez les bovins, les publications ne montrent pas d'effets majeurs ou univoques sur la fertilité, la production laitière et la santé dans les exploitations exposées en conditions non contrôlées ou semi-contrôlées. Il est rapporté lors des essais en conditions contrôlées (CEM de 30 μ T, 30 jours) une baisse possible de la production laitière, du taux butyreux et une augmentation de l'ingestion.

Chez les volailles, une plus forte mortalité et une inhibition du développement embryonnaire (avec « effet fenêtre » pour les doses efficaces), ont été rapportées tandis que l'effet tératogène est controversé. Quelques effets favorables ont été décrits : résistance à la coccidiose, reproduction.

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 CEM.

5.4 Les hypothèses mécanistiques des effets des champs électromagnétiques

Compte tenu des quelques effets rapportés certaines hypothèses peuvent être avancées pour les expliquer :

- L'exposition aux CEM-EBF peut, dans certains cas, modifier les **rythmes biologiques**, mais l'origine de ces altérations n'est pas clairement identifiée. Plusieurs mécanismes hypothétiques ont été proposés (mélatonine, cryptochromes) mais aucun d'entre eux ne peut revendiquer l'exclusivité causale.
- A des niveaux élevés d'exposition (et ayant peu de chance d'être retrouvés en situation de vie courante) une modification de l'importance des **échanges ioniques transmembranaires** est observable. Cependant la transposition de ces données à des expositions plus faibles est impossible et les conséquences de ces altérations restent dans tous les cas indéterminées.
- L'exposition à des CEM-EBF peut entraîner certaines **altérations de l'ADN** des cellules touchées par ces ondes. La plupart de ces altérations initiales semblent être rapidement corrigées et ne conduisent pas à des problèmes biologiques suite à une exposition. Cependant, on peut se poser la question des effets éventuels de ces ondes suite à des expositions répétées et en interaction avec des agents génotoxiques, chimiques par exemple. Très peu d'informations sont disponibles à ce sujet.
- *In vitro*, les CEM stimulent la **réponse immunitaire** innée, notamment à travers la formation de radicaux libres tandis qu'*in vivo* (animaux de laboratoire), on constate de manière inconstante une diminution du nombre de lymphocytes (notamment CD4+ et NK) et de l'activité cytotoxique des lymphocytes.
- L'implication du **stress oxydant** dans l'éventuelle pathogénicité des CEM-EBF reste hypothétique même si certaines données suggèrent que ces ondes pourraient participer à la génération d'un stress oxydant.

De nombreux travaux sont toujours en cours sur ces mécanismes hypothétiques et il est nécessaire de continuer la veille scientifique dans ces domaines en veillant à la qualité des protocoles expérimentaux mis en œuvre.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail et par le comité d'experts spécialisé Santé animale : 27 mars 2015 et 07 avril 2015.

6 Bibliographie

- AFNOR (2010) 'Protocole pour la mesure in situ des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité.' (AFNOR) pp19
- AFNOR (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) pp60
- Afsset (2010) 'Les extrêmement basses fréquences : effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.' (Afsset: Maisons-Alfort, France) pp170
- Akan Z, Aksu B, Tulunay A, Bilsel S, Inhan-Garip A (2010) Extremely low-frequency electromagnetic fields affect the immune response of monocyte-derived macrophages to pathogens. *Bioelectromagnetics* **31**(8), 603-612.
- Al-Akhras MA, Darmani H, Elbetieha A (2006) Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats. *Bioelectromagnetics* **27**(2), 127-131.
- Alabovskii VV, Gotovskii MI, Vinokurov AA, Maslov OV (2013) The influence of application of a low-frequency magnetic field on the serum corticosterone level (an experimental study). *Voprosy kurortologii, fizioterapii, i lechebnoï fizicheskoi kultury*(5), 3-5.
- Algers B, Ekesbo I, Hennichs K (1981) 'The effects of ultra high voltage transmission lines on the fertility of dairy cows. A preliminary study.' (Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Hygiene with Farrier school, Skara, Suède)
- Algers B, Hennichs K (1985) The effect of exposure to 400 kV transmission lines on the fertility of cows. A retrospective cohort study. *Preventive Veterinary Medicine* **3**(4), 351-361.
- Algers B, Hultgren J (1987) Effects of long-term exposure to a 400-kV, 50-Hz transmission line on estrous and fertility in cows. *Preventive Veterinary Medicine* **5**(1), 21-36.
- Amstutz H, Miller EDB (1980) A study of farm animals near 765 kV transmission lines. *Bovine Practice* **15**, 51.
- Anand SN, Maywood ES, Chesham JE, Joynson G, Banks GT, Hastings MH, Nolan PM (2013) Distinct and separable roles for endogenous CRY1 and CRY2 within the circadian molecular clockwork of the Suprachiasmatic Nucleus, as revealed by the Fbxl3Afh mutation. *Journal of Neuroscience* **33**(17), 7145-7153.
- Aneshansley DJ, Gorewit RC, Price LR (1992) Cow sensitivity to electricity during milking. *Journal of Dairy Science* **75**(10), 2733-2741.
- Angell RF, Schott MR, Raleigh RJ, Bracken TD (1990) Effects of a high-voltage direct-current transmission line on beef cattle production. *Bioelectromagnetics* **11**(4), 273-282.
- Anselmo CWSF, Pereira PB, Catanho MTJA, Medeiros MC (2009) Effects of the electromagnetic field, 60 Hz, 3 μ T, on the hormonal and metabolic regulation of undernourished pregnant rats. *Brazilian Journal of Biology* **69**(2), 397-404.
- Anselmo CWSF, Santos AAA, Freire CMA, Ferreira LMP, Cabral Filho JE, Catanho MTJA, do Carmo Medeiros M (2006) Influence of a 60 Hz, 3 μ T, electromagnetic field on the reflex maturation of wistar rats offspring from mothers fed a regional basic diet during pregnancy. *Nutritional Neuroscience* **9**(5-6), 201-206.
- Anselmo CWSF, Silva TL, Holanda TG, Prado LVS, Cabral-Filho JE, Catanho MTJA, Medeiros MC (2008) Influence of a 60 Hz, 3 μ T, electromagnetic field on the somatic maturation of wistar rat offspring fed a regional basic diet during pregnancy. *Brazilian Journal of Biology* **68**(3), 641-648.
- Appleman RD, Gustafson RJ (1985) Source of stray voltage and effect on cow health and performance. *Journal of Dairy Science* **68**(6), 1554-1567.

- Babri S, Mirzaei Babil F, Ebrahimi H (2010) Effect of extremely low-frequency electromagnetic field (50 Hz, 5mT) on memory consolidation and retrieval in male rats. *Journal of Babol University of Medical Sciences* **12**(3), 12-18.
- Balassa T, Szemerszky R, Bárdos GY (2009) Effect of short-term 50 Hz electromagnetic field exposure on the behavior of rats. *Acta Physiologica Hungarica* **96**(4), 437-448.
- Balassa T, Varró P, Elek S, Drozdovszky O, Szemerszky R, Világi I, Bárdos G (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* **31**(8), 724-730.
- Basov BM (2007) On electric fields of power lines and on their perception by freshwater fish. *Journal of Ichthyology* **47**(8), 656-661.
- Beck B, Cholewka A, Królak-Olejnik B, Mertas A, Szliszka E, Drzazga Z, Król W (2006) An effect of extremely low frequency magnetic field on TNF-alpha concentration in serum. *Polish Journal of Environment Studies* **15**(4A), 16-18.
- Beck B, Mazur B, Salwiczek A, Królak-Olejnik B, Cholewka A, Drzazga Z, Arendt J, Król W, Ślusarczyk K (2007) Quantitative changes in CD3+ and CD45RA+ lymphocytes in the blood of rats exposed to an extremely low frequency magnetic field. *Medycyna Weterynaryjna* **63**(8), 946-950.
- Bediz CS, Baltaci AK, Mogulkoc R, Öztekin E (2006) Zinc supplementation ameliorates electromagnetic field-induced lipid peroxidation in the rat brain. *Tohoku Journal of Experimental Medicine* **208**(2), 133-140.
- Begall S, Červený J, Neef J, Vojtěch O, Burda H (2008) Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **105**(36), 13451-13455.
- Begall S, Malkemper EP, červený J, Němec P, Burda H (2013) Magnetic alignment in mammals and other animals. *Mammalian Biology* **78**(1), 10-20.
- Bernabò N, Tettamanti E, Pistilli MG, Nardinocchi D, Berardinelli P, Mattioli M, Barboni B (2007) Effects of 50 Hz extremely low frequency magnetic field on the morphology and function of boar spermatozoa capacitated in vitro. *Theriogenology* **67**(4), 801-815.
- Bernabò N, Tettamanti E, Russo V, Martelli A, Turriani M, Mattoli M, Barboni B (2010) Extremely low frequency electromagnetic field exposure affects fertilization outcome in swine animal model. *Theriogenology* **73**(9), 1293-1305.
- Bindokas VP, Gauger JR, Greenberg B (1988) Exposure scheme separates effects of electric shock and electric field for honey bees, *Apis mellifera* L. *Bioelectromagnetics* **9**(3), 275-284.
- Biskup T, Hitomi K, Getzoff ED, Krapf S, Koslowski T, Schleicher E, Weber S (2011) Unexpected electron transfer in cryptochrome identified by time-resolved EPR spectroscopy. *Angewandte Chemie - International Edition* **50**(52), 12647-12651.
- Boissin J, Canguhem B (1998) 'Les rythmes du vivant. Origine et contrôle des rythmes biologiques.' (Université-CNRS) Eds.320pp.
- Bolisetty S, Jaimes EA (2013) Mitochondria and reactive oxygen species: Physiology and pathophysiology. *International Journal of Molecular Sciences* **14**(3), 6306-6344.
- Bonhomme-Faivre L, Macé A, *et al.* (1998) Alterations of biological parameters in mice chronically exposed to low- frequency (50 hz) electromagnetic fields. *Life Sciences* **62**(14), 1271-1280.
- Bonhomme-Faivre L, Marion S, Forestier F, Santini R, Auclair H (2003) Effects of electromagnetic fields on the immune systems of occupationally exposed humans and mice. *Archives of Environmental Health* **58**(11), 712-717.
- Bonnet-Belfais M, Lambrozo J, Aurengo A (2013) Comment: Childhood leukaemia and power lines - The Geocap study: Is proximity an appropriate MF exposure surrogate? *British Journal of Cancer* **109**(5), 1382-1383.

- Borhani N, Rajaei F, Salehi Z, Javadi A (2011) Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field. *Electromagnetic Biology and Medicine* **30**(4), 246-252.
- Brennan TM, Gustafson RJ (1986) Behavioral study of dairy cow sensitivity to short AC currents. In 'American Society of Agricultural Engineers-North Central Region/Canadian Society of Agricultural Engineering 1986 Annual Meeting.' Winnipeg, Canada)
- Brugère H (2002) Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage. *Bulletin de la Société Vétérinaire Pratique de France* **86**, 182-196.
- Brugère H (2010) Electropathologie en élevage, Health problems on livestock farms attributed to electronical phenomena. *Bulletin Académie Vétérinaire* **163**, 231-233.
- Burchard JF, Monardes H, Nguyen DH (2003) Effect of 10 kV, 30 μ T, 60 Hz Electric and Magnetic Fields on Milk Production and Feed Intake in Nonpregnant Dairy Cattle. *Bioelectromagnetics* **24**(8), 557-563.
- Burchard JF, Nguyen DH, Block E (1998) Effects of Electric and Magnetic Fields on Nocturnal Melatonin Concentrations in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **81**(3), 722-727.
- Burchard JF, Nguyen DH, Monardes HG (2007) Exposure of pregnant dairy heifer to magnetic fields at 60 Hz and 30 μ T. *Bioelectromagnetics* **28**(6), 471-476.
- Burchard JF, Nguyen DH, Monardes HG, Petitclerc D (2004) Lack of Effect of 10 kV/m 60 Hz Electric Field Exposure on Pregnant Dairy Heifer Hormones. *Bioelectromagnetics* **25**(4), 308-312.
- Burchard JF, Nguyen DH, Richard L, Block E (1996) Biological Effects of Electric and Magnetic Fields on Productivity of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* **79**(9), 1549-1554.
- Burchard JF, Nguyen DH, Rodriguez M (2006) Plasma concentrations of thyroxine in dairy cows exposed to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics* **27**, 553-559.
- Burda H, Begall S, Červený J, Neef J, Němec P (2009) Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106**(14), 5708-5713.
- Burda H, Marhold S, Westenberger T, Wiltschko R, Wiltschko W (1990) Magnetic compass orientation in the subterranean rodent *Cryptomys hottentotus* (Bathergidae). *Experientia* **46**(5), 528-530.
- Busby IC, Driscoll D, Washbon WE (1974) A field survey of farmer experience with 765 kV transmission lines: November 18-20, 1974. Agricultural Resources Commission, State of New York, Albany, NY.
- Canseven AG, Seyhan N, Mirshahidi S, Imir T (2006) Suppression of natural killer cell activity on *Candida Stellatoidea* by a 50 Hz magnetic field. *Electromagnetic Biology and Medicine* **25**(2), 79-85.
- Červený J, Begall S, Koubek P, Nováková P, Burda H (2011) Directional preference may enhance hunting accuracy in foraging foxes. *Biology Letters* **7**(3), 355-357.
- Chaves I, Pokorny R, et al. (2011) The cryptochromes: blue light photoreceptors in plants and animals. *Annual review of plant biology* **62**, 335-364.
- Che Y, Suna H, Cui Y, Zhou D, Ma Y (2007) Effects of exposure to 50 Hz magnetic field of 1mT on the performance of detour learning task by chicks. *Brain Research Bulletin* **74**, 178-182.
- Cho S, Lee Y, Lee S, Choi YJ, Chung HW (2014) Enhanced cytotoxic and genotoxic effects of gadolinium following ELF-EMF irradiation in human lymphocytes. *Drug and Chemical Toxicology* **37**(4), 440-447.
- Chung MK, Kim JC, Myung SH (2004) Lack of Adverse Effects in Pregnant/Lactating Female Rats and Their Offspring Following Pre- and Postnatal Exposure to ELF Magnetic Fields. *Bioelectromagnetics* **25**(4), 236-244.
- Churchward RE (1948) A note on the occurrence of electrical shocks from milking machines and their possible effects on mastitis. *Australian Veterinary Journal* **24**(6), 150.

- Clarke D, Whitney H, Sutton G, Robert D (2013) Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. *Science* **340**(6128), 66-69.
- Consales C, Merla C, Marino C, Benassi B (2012) Electromagnetic fields, oxidative stress, and neurodegeneration. *International Journal of Cell Biology* **2012**, 16.
- Conseil de l'Union Européenne (1999) Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 Hz) (1999/519/CE) *Journal officiel des communautés européennes* 1999, 59-70.
- Coulton LA, Barker AT (1991) The effect of low-frequency pulsed magnetic fields on chick embryonic growth. *Physics in Medicine and Biology* **36**(3), 369-381.
- Craine LB (1975) Effects on mammals of grounded neutral voltages from distribution power lines. *IEEE Industry Applications Society, New York* 75-303.
- Cuppen JJM, Wiegertjes GF, Lobee HWJ, Savelkoul HFJ, Elmusharaf MA, Beynen AC, Grooten HNA, Smink W (2007) Immune stimulation in fish and chicken through weak low frequency electromagnetic fields. *Environmentalist* **27**(4), 577-583.
- Dantzer R, Mormède P (1983) Stress in farm animals: a need for reevaluation. *Journal of animal science* **57**(1), 6-18.
- de Kleijn S, Bouwens M, Verburg-van Kemenade BM, Cuppen JJ, Ferwerda G, Hermans PW (2011) Extremely low frequency electromagnetic field exposure does not modulate toll-like receptor signaling in human peripheral blood mononuclear cells. *Cytokine* **54**(1), 43-50.
- Debruyne L, Dejager L (1994) Electric field exposure and evidence of stress in mice. *Environmental Research* **65**(1), 149-160.
- Del Re B, Marcantonio P, Gavoçi E, Bersani F, Giorgi G (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.
- Delgado JMR, Leal J, Monteagudo JL, Garcia Gracia M (1982) Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields. *Journal of Anatomy* **134**(3), 533-551.
- Deutschlander ME, Freake MJ, Borland SC, Phillips JB, Madden RC, Anderson LE, Wilson BW (2003) Learned magnetic compass orientation by the Siberian hamster, *Phodopus sungorus*. *Animal Behaviour* **65**(4), 779-786.
- Di Bella G, Mascia F, Gualano L, Di Bella L (2013) Melatonin anticancer effects: Review. *International Journal of Molecular Sciences* **14**(2), 2410-2430.
- Di Loreto S, Falone S, Caracciolo V, Sebastiani P, D'Alessandro A, Mirabilio A, Zimmiti V, Amicarelli F (2009) Fifty hertz extremely low-frequency magnetic field exposure elicits redox and trophic response in rat-cortical neurons. *Journal of Cellular Physiology* **219**(2), 334-343.
- Dockerty JD, Elwood JM, Skegg DCG, Herbison GP (1998) Electromagnetic field exposures and childhood cancers in New Zealand. *Cancer Causes and Control* **9**(3), 299-309.
- Doherty Jr PF, Grubb Jr TC (1998) Reproductive success of cavity-nesting birds breeding under high-voltage powerlines. *American Midland Naturalist* **140**(1), 122-128.
- Elmusharaf MA, Cuppen JJ, Grooten HNA, Beynen AC (2007) Antagonistic effect of electromagnetic field exposure on coccidiosis infection in broiler chickens. *Poultry Science* **86**(10), 2139-2143.
- Engelmann M, Wotjak CT, Landgraf R (1995) Social discrimination procedure: an alternative method to investigate juvenile recognition abilities in rats. *Physiology & behavior* **58**(2), 315-321.
- Engels S, Schneider NL, et al. (2014) Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature* **509**(7500), 353-356.
- Erdreich LS, Alexander DD, Wagner ME, Reinemann D (2009) Meta analysis of stray voltage on dairy cattle. *Journal of Dairy Science* **92**(12), 5951-5963.

- Eskelinen T, Keinänen J, Salonen H, Juutilainen J (2002) Use of Spot Measurements for Assessing Residential ELF Magnetic Field Exposure: A Validity Study. *Bioelectromagnetics* **23**(2), 173-176.
- Falone S, Grossi MR, Cinque B, D'Angelo B, Tettamanti E, Cimini A, Di Ilio C, Amicarelli F (2007) Fifty hertz extremely low-frequency electromagnetic field causes changes in redox and differentiative status in neuroblastoma cells. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* **39**(11), 2093-2106.
- Falone S, Mirabilio A, Carbone MC, Zimmitti V, Di Loreto S, Mariggio MA, Mancinelli R, Di Ilio C, Amicarelli F (2008) Chronic exposure to 50Hz magnetic fields causes a significant weakening of antioxidant defence systems in aged rat brain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* **40**(12), 2762-70.
- Fernie KJ, Bird DM, Dawson RD, Laguë PC (2000a) Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of American kestrels. *Physiological and Biochemical Zoology* **73**(1), 60-65.
- Fernie KJ, Bird DM, Petitclerc D (1999) Effects of electromagnetic fields on photophasic circulating melatonin levels in American kestrels. *Environmental Health Perspectives* **107**(11), 901-904.
- Fernie KJ, Leonard NJ, Bird DM (2000b) Behavior of free-ranging and captive American kestrels under electromagnetic fields. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A* **59**(8), 597-603.
- Fernie KJ, Reynolds SJ (2005) The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: A review. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews* **8**(2), 127-140.
- Feychting M, Ahlbom A (1993) Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *American Journal of Epidemiology* **138**(7), 467-481.
- Focke F, Schuermann D, Kuster N, Schär P (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.
- Forkman B, Boissy A, Meunier-Salaün M-C, Canali E, Jones R (2007) A critical review of fear tests used on cattle, pigs, sheep, poultry and horses. *Physiology & Behavior* **92**(3), 340-374.
- Foroozandeh E, Ahadi H, Askari P, Naeini MS (2011) Effects of single, brief exposure to an 8 mT electromagnetic field on avoidance learning in male and female mice. *Psychology and Neuroscience* **4**(1), 143-148.
- Foroozandeh E, Derakhshan-Barjoei P, Jadidi M (2013) Toxic effects of 50 Hz electromagnetic field on memory consolidation in male and female mice. *Toxicology and Industrial Health* **29**(3), 293-299.
- Frahm J, Lantow M, Lupke M, Weiss DG, Simkó M (2006) Alteration in cellular functions in mouse macrophages after exposure to 50 Hz magnetic fields. *Journal of Cellular Biochemistry* **99**(1), 168-177.
- Frahm J, Mattsson MO, Simkó M (2010) Exposure to ELF magnetic fields modulate redox related protein expression in mouse macrophages. *Toxicology Letters* **192**(3), 330-336.
- Ganskopp D, Raleigh R, Schott M, Bracken TD (1991) Behavior of cattle in pens exposed to ± 500 kV DC transmission lines. *Applied Animal Behaviour Science* **30**(1-2), 1-16.
- Gavoçi E, Zironi I, Remondini D, Virelli A, Castellani G, Del Re B, Giorgi G, Aicardi G, Bersani F (2013) ELF magnetic fields tuned to ion parametric resonance conditions do not affect TEA-sensitive voltage-dependent outward K⁺ currents in a human neural cell line. *Bioelectromagnetics* **34**(8), 579-588.
- Gegear RJ, Casselman A, Waddell S, Reppert SM (2008) Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*. *Nature* **454**(7207), 1014-1018.

- Gerth C, Schlykova L, Thoss F, Drischel H (1983) The influence of an alternating magnetic field on conditioning and extinction of conditioned reactions in rats. *Biomedica Biochimica Acta* **42**(9), 1199-1204.
- Gillespie T Stray electrical voltage. In 'Swine herd Health Programming Conference', 1984, St Paul, Minnesota, USA, pp. 260-262
- Gilmer DS, Wiehe JM (1977) Nesting by ferruginous hawks and other raptors in high voltage power line towers. *Prairie Naturalist* **9**, 1-10.
- Gobba F, Bargellini A, Bravo G, Scaringi M, Cauteruccio L, Borella P (2009) Natural killer cell activity decreases in workers occupationally exposed to extremely low frequency magnetic fields exceeding 1 μ T. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology* **22**(4), 1059-1066.
- Godcharles L, Robert S, Matte JJ, Bertin-Mahieux J, Martineau GP (1993) Transient stray voltage: Is it detrimental to growth performance, health status and welfare of market pigs? *Veterinary Research Communications* **17**(1), 41-53.
- Goraca A, Ciejka E, Piechota A (2010) Effects of extremely low frequency magnetic field on the parameters of oxidative stress in heart. *Journal of Physiology and Pharmacology* **61**(3), 333-338.
- Gorewit R, Aneshansley D, Ludington D, Pellerin R, Zhao X (1989) AC voltages on water bowls: effects on lactating Holsteins. *Journal of Dairy Science* **72**, 2184-2192.
- Gorewit RC, Aneshansley DJ, Price LR (1992a) Effects of voltages on cows over a complete lactation. 1. Milk yield and composition. *Journal of Dairy Science* **75**(10), 2719-2725.
- Gorewit RC, Aneshansley DJ, Price LR (1992b) Effects of voltages on cows over a complete lactation. 2. Health and reproduction. *Journal of Dairy Science* **75**(10), 2726-2732.
- Gorewit RC, Scott NR (1986) Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *Journal of Dairy Science* **69**(4), 1122-1127.
- Gorewit RC, Scott NR, Czarniecki CS (1985) Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semirandomly in a nonavoidance environment. *Journal of Dairy Science* **68**(3), 718-725.
- GPSE. Mieux connaître les risques des courants électriques parasites dans les exploitations d'élevage. En ligne: http://www.gpse.fr/images/plaquette/plaquette_courants_parasites.pdf [dernière consultation le 14 décembre 2014]
- Grellier J, Ravazzani P, Cardis E (2014) Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe. *Environment international* **62**, 55-63.
- Gustafson RJ, Appleman RD, Brennan TM (1986) Electrical current sensitivity of growing/finishing swine for drinking. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **29**(2), 592-596.
- Gustafson RJ, Brennan TM, Appleman RD (1985) Behavioral studies of dairy cow sensitivity to AC and DC electric currents. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **28**(5), 1680-1685.
- Hackman RM, Graves HB (1981) Corticosterone levels in mice exposed to high-intensity electric fields. *Behavioral and Neural Biology* **32**(2), 201-213.
- Hafizi L, Sazgarnia A, Mousavifar N, Karimi M, Ghorbani S, Kazemi MR, Meibodi NE, Hosseini G, Toroghi HM (2014) The effect of extremely low frequency pulsed electromagnetic field on in vitro fertilization success late in NMRI mice. *Cell Journal* **15**(4), 310-315.
- Hamann HJ, Schmidt KH, Wiltshicho W (1998) Mögliche wirkungen elektrischer und magnetischer felder auf die brutbiologie von vögeln am beispiel einer population von höhlenbrütenden singvögeln an einer stromtrasse. *Zeitschrift für Vogel- kunde und Naturschutz in Hessen Vogel und Umwelt.* **9**, 215-246.
- Harakawa S, Takahashi I, Doge F, Martin DE (2004) Effect of a 50 Hz electric field on plasma ACTH, glucose, lactate, and pyruvate levels in stressed rats. *Bioelectromagnetics* **25**(5), 346-351.

- Hastings MH, Brancaccio M, Maywood ES (2014) Circadian pacemaking in cells and circuits of the suprachiasmatic nucleus. *Journal of Neuroendocrinology* **26**(1), 2-10.
- Hefeneider SH (1994) 'Joint HVAC transmission EMF environmental study: Final report on experiment 3.' (Bonneville Power Administration, Portland, Oregon.)
- Hefeneider SH, McCoy SL, Hausman FA, Christensen HL, Takahashi D, Perrin N, Dan Bracken T, Shin KY, Hall AS (2001) Long-term effects of 60-Hz electric vs. magnetic fields on IL-1 and IL-2 activity in sheep. *Bioelectromagnetics* **22**(3), 170-177.
- Henke Drenkard DV, Gorewit RC, Scott NR, Sagi R (1985) Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *Journal of Dairy Science* **68**(10), 2694-2702.
- Henke DV, Gorewit RC, Scott NR, Skyer DM Sensitivity of cows to transient electrical current. In '1982 Summer Meeting - American Society of Agricultural Engineers.', 1982, Madison, Wis, USA,
- Holland RA, Thorup K, Vonhof MJ, Cochran WW, Wikelski M (2006) Navigation: Bat orientation using Earth's magnetic field. *Nature* **444**(7120), 702-702.
- Holmes A (2001) Targeted gene mutation approaches to the study of anxiety-like behavior in mice. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **25**(3), 261-273.
- Hong MN, Han NK, Lee HC, Ko YK, Chi SG, Lee YS, Gimm YM, Myung SH, Lee JS (2012) Extremely low frequency magnetic fields do not elicit oxidativestress in MCF10A cells. *Journal of Radiation Research* **53**(1), 79-86.
- Hsu CY, Ko FY, Li CW, Fann K, Lue JT (2007) Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*). *PLoS ONE* **2**(4), e395.
- Hultgren J (1989) Cows and electricity study, biological interaction and effects on cow behaviour, health and reproduction of stray voltage, electric cow-trainers and high voltage transmission lines. Swed. Univ. Agric. Sci., Dep. Anim. Hygiene with Farrier School, Skara, Sweden.
- Hultgren J (1990) Small electric currents affecting farm animals and man: A review with special reference to stray voltage - I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Veterinary Research Communications* **14**(4), 287-298.
- IARC (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**, 429pp.
- Ivancsits S, Pilger A, Diem E, Jahn O, Rüdiger HW (2005) Cell type-specific genotoxic effects of intermittent extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* **583**(2), 184-188.
- Jadidi M, Firoozabadi SM, Rashidy-Pour A, Sajadi AA, Sadeghi H, Taherian AA (2007) Acute exposure to a 50 Hz magnetic field impairs consolidation of spatial memory in rats. *Neurobiology of Learning and Memory* **88**(4), 387-392.
- Jahandideh S, Abdolmaleki P (2010) Prediction of melatonin excretion patterns in the rat exposed to ELF magnetic fields based on support vector machine and linear discriminant analysis. *Micron* **41**(7), 882-885.
- Jahandideh S, Abdolmaleki P, Movahedi MM (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.
- Janać B, Pešić V, Jelenković A, Vorobyov V, Prolić Z (2005) Different effects of chronic exposure to ELF magnetic field on spontaneous and amphetamine-induced locomotor and stereotypic activities in rats. *Brain Research Bulletin* **67**(6), 498-503.
- Jin YB, Choi SH, Lee JS, Kim JK, Lee JW, Hong SC, Myung SH, Lee YS (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.
- Juutilainen J (2008) Do electromagnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? *Radiation protection dosimetry* **132**(2), 228-31.

- Juutilainen J, Kumlin T, Naarala J (2006) Do extremely low frequency magnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? A meta-analysis of experimental studies. *International Journal of Radiation Biology* **82**(1), 1-12.
- Juutilainen J, Lang S, Rytomaa T (2000) Possible cocarcinogenic effects of ELF electromagnetic fields may require repeated long-term interaction with known carcinogenic factors. *Bioelectromagnetics* **21**(2), 122-128.
- Kato M, Honma K, Shigemitsu T, Shiga Y (1994a) Circularly polarized 50-Hz magnetic field exposure reduces pineal gland and blood melatonin concentrations of Long-Evans rats. *Neuroscience Letters* **166**(1), 59-62.
- Kato M, Honma K, Shigemitsu T, Shiga Y (1994b) Horizontal or vertical 50-Hz, 1- μ T magnetic fields have no effect on pineal gland or plasma melatonin concentration of albino rats. *Neuroscience Letters* **168**(1-2), 205-208.
- Kato M, Honma K, Shigemitsu T, Shiga Y (1994c) Recovery of nocturnal melatonin concentration takes place within one week following cessation of 50 Hz circularly polarized magnetic field exposure for six weeks. *Bioelectromagnetics* **15**(5), 489-492.
- Kato M, Honma KI, Shigemitsu T, Shiga Y (1993) Effects of exposure to a circularly polarized 50-Hz magnetic field on plasma and pineal melatonin levels in rats. *Bioelectromagnetics* **14**(2), 97-106.
- Kaune WT, Savitz DA (1994) Simplification of the Wertheimer-Leeper wire code. *Bioelectromagnetics* **15**(4), 275-282.
- Kimchi T, Terkel J (2001) Magnetic compass orientation in the blind mole rat *Spalax ehrenbergi*. *Journal of Experimental Biology* **204**(4), 751-758.
- Kirk JH, Reese ND, Bartlett PC (1984) Stray voltage on Michigan dairy farms. *Journal of the American Veterinary Medical Association* **185**(4), 426-428.
- Kirschvink J, Dizon A, Westphal J (1986) Evidence from Strandings for Geomagnetic Sensitivity in Cetaceans. *Journal of Experimental Biology* **120**, 1-24.
- Kitaoka K (2013) 'Does chronic ELF-MF exposure directly stimulates adrenal cortex in mice?' (Magnetic Health Science Foundation: Fukuoka, Japan) 32 pp.
- Kitaoka K, Kitamura M, Aoi S, Shimizu N, Yoshizaki K (2013a) Chronic exposure to an extremely low-frequency magnetic field induces depression-like behavior and corticosterone secretion without enhancement of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in mice. *Bioelectromagnetics* **34**(1), 43-51.
- Kitaoka K, Kitamura M, Aoi S, Shimizu N, Yoshizaki K (2013b) Erratum: Low-frequency magnetic field induces depression-like behavior and corticosterone secretion without enhancement of the hypothalamic-pituitary-adrenal Axis in mice. *Bioelectromagnetics* **34**(7), 562-562.
- Knezević D (2005) Suppression of tumor immunity by electromagnetic fields and glucocorticoids in mice with implanted Ehrlich carcinoma. *Medicinski pregljed* **58**(11-12), 609-613.
- Krueger WF, Giarola AJ, Bradley JW, Shrekenhamer A (1975) Effects of electromagnetic fields on fecundity in the chicken. *Annals of the New York Academy of Sciences* **vol. 247**, 391-400.
- Kryston TB, Georgiev AB, Pissis P, Georgakilas AG (2011) Role of oxidative stress and DNA damage in human carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* **711**(1-2), 193-201.
- Lagroye I, Percherancier Y, Juutilainen J, De Gannes FP, Veyret B (2011) ELF magnetic fields: Animal studies, mechanisms of action. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* **107**(3), 369-373.
- Lahijani MS, Sajadi K (2004) Development of preincubated chicken eggs following exposure to 50 Hz electromagnetic fields with 1.33-7.32 mT flux densities. *Indian Journal of Experimental Biology* **42**(9), 858-865.
- Lai H, Carino M (1999) 60 Hz magnetic fields and central cholinergic activity: Effects of exposure intensity and duration. *Bioelectromagnetics* **20**(5), 284-289.

- Lee HJ, Jin YB, Lee JS, Choi JI, Lee JW, Myung SH, Lee YS (2012) Combined effects of 60 Hz electromagnetic field exposure with various stress factors on cellular transformation in NIH3T3 cells. *Bioelectromagnetics* **33**(3), 207-14.
- Lee Jr JM, Stormshak F, Thompson JM, Hess DL, Foster DL (1995) Melatonin and puberty in female lambs exposed to EMF: a replicate study. *Bioelectromagnetics* **16**(2), 119-123.
- Lee Jr JM, Stormshak F, Thompson JM, Thinesen P, Painter LJ, Olenchek EG, Hess DL, Forbes R, Foster DL (1993) Melatonin secretion and puberty in female lambs exposed to environmental electric and magnetic fields. *Biology of Reproduction* **49**(4), 857-864.
- Lefcourt AM (1991) Effects of electrical voltage/current on farm animals. How to detect and remedy problems. *Agriculture Handbook n°696 (Washington)*, 1.1-9.4.
- Lefcourt AM, Akers RM (1982) Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *Journal of Dairy Science* **65**(11), 2125-2130.
- Lefcourt AM, Akers RM, Miller RH, Weinland B (1985) Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *Journal of Dairy Science* **68**(2), 391-401.
- Lefcourt AM, Kahl S, Akers RM (1986) Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *Journal of Dairy Science* **69**(3), 833-842.
- Li G, Li DD, Li YY, Lin L (2011) Effects of 50 Hz magnetic fields with different intensities exposure on transient outward potassium channel of cortical neurons. *Progress in Biochemistry and Biophysics* **38**(11), 1036-1042.
- Liburdy RP (1992) Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Annals of the New York Academy of Sciences* **649**, 74-95.
- Liedvogel M, Maeda K, Henbest K, Schleicher E, Simon T, Timmel CR, Hore PJ, Mouritsen H (2007) Chemical magnetoreception: Bird cryptochrome 1a is excited by blue light and forms long-lived radical-pairs. *PLoS ONE* **2**(10), e1106.
- Liedvogel M, Mouritsen H (2010) Cryptochromes - A potential magnetoreceptor: What do we know and what do we want to know? *Journal of the Royal Society Interface* **7**(Suppl. 2), S147-S162.
- Lihoreau M, Raine NE (2013) Bee positive: The importance of electroreception in pollinator cognitive ecology. *Frontiers in Psychology* **4**, e445.
- Lipinski Z (2006) How far should bees be located from the high voltage power lines? *Journal of Apicultural Research* **45**(4), 240-242.
- Liu T, Wang S, He L, Ye K (2008) Anxiogenic effect of chronic exposure to extremely low frequency magnetic field in adult rats. *Neuroscience Letters* **434**(1), 12-17.
- London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng TC, Peters JM (1991) Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *American Journal of Epidemiology* **134**(9), 923-937.
- Lotfi A, Narimani-Rad M (2012) Effect of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (50 Hz, 0.5 mT) during incubation on hatchability, T3 and T4 levels in newly-hatched chicks. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances* **7**(8), 733-738.
- Luukkonen J, Liimatainen A, Hoyto A, Juutilainen J, Naarala J (2011) Pre-exposure to 50 Hz magnetic fields modifies menadione-induced genotoxic effects in human SH-SY5Y neuroblastoma cells. *PLoS ONE* **6**(3), e18021.
- Luukkonen J, Liimatainen A, Juutilainen J, Naarala J (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.
- Maeda K, Robinson AJ, et al. (2012) Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **109**(13), 4774-4779.

- Mahmoud AA, McAfee RD, Bishop RR (1989) Biological effects on swine and primates due to power frequency and radio frequency radiation. *Electric Power Systems Research* **17**(1), 29-34.
- Mannerling AC, Simkó M, Mild KH, Mattsson MO (2010) Effects of 50-Hz magnetic field exposure on superoxide radical anion formation and HSP70 induction in human K562 cells. *Radiation and Environmental Biophysics* **49**(4), 731-741.
- Marchionni I, Paffi A, Pellegrino M, Liberti M, Apollonio F, Abeti R, Fontana F, D'Inzeo G, Mazzanti M (2006) Comparison between low-level 50 Hz and 900 MHz electromagnetic stimulation on single channel ionic currents and on firing frequency in dorsal root ganglion isolated neurons. *Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes* **1758**(5), 597-605.
- Marhold S, Wiltschko W, Burda H (1997) A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften* **84**(9), 421-423.
- Marino AA, Wolcott RM, Chervenak R, Jourd'heuil F, Nilsen E, Frilot li C, Pruett SB (2001) Coincident nonlinear changes in the endocrine and immune systems due to low-frequency magnetic fields. *NeuroImmunoModulation* **9**(2), 65-77.
- Mariucci G, Villarini M, Moretti M, Taha E, Conte C, Minelli A, Aristei C, Ambrosini MV (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.
- Markkanen A, Juutilainen J, Naarala J (2008) Pre-exposure to 50 Hz magnetic fields modifies menadione-induced DNA damage response in murine L929 cells. *International Journal of Radiation Biology* **84**(9), 742-751.
- Martin FB, Bender A, Steuernagel G, Robinson RA, Revsbech R, Sorensen DK, Williamson N, Williams A (1986) Epidemiologic study of Holstein dairy cow performance and reproduction near a high-voltage direct-current powerline. *Journal of Toxicology and Environmental Health* **19**(3), 303-324.
- Maruvada PS, Jutras P, Turgeon A (1996) 'Caractérisation de l'exposition aux champs électriques et magnétiques des vaches et du personnel dans les fermes laitières typiques.' (Hydro-Quebec: Montreal, Canada) 26 pp
- Matte J, Robert S, Godcharles L, Bertin-Mahieux J, Martineau G (1992) Factors affecting the electrical-impedance of growing-finishing pigs. *Canadian Agricultural Engineering* **34**, 189-194.
- Mattsson MO, Simkó M (2012) Is there a relation between extremely low frequency magnetic field exposure, inflammation and neurodegenerative diseases? A review of in vivo and in vitro experimental evidence. *Toxicology* **301**(1-3), 1-12.
- McBride ML, Gallagher RP, et al. (1999) Power-Frequency Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia in Canada. *American Journal of Epidemiology* **149**(9), 831-842.
- McKay BE, Persinger MA (2000) Application timing of complex magnetic fields delineates windows of posttraining-pretesting vulnerability for spatial and motivational behaviors in rats. *International Journal of Neuroscience* **103**(1-4), 69-77.
- Morgado-Valle C, Verdugo-Díaz L, García DE, Morales-Orozco C, Drucker-Colín R (1998) The role of voltage-gated Ca²⁺ channels in neurite growth of cultured chromaffin cells induced by extremely low frequency (ELF) magnetic field stimulation. *Cell and Tissue Research* **291**(2), 217-230.
- Morris R (1984) Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of Neuroscience Methods* **11**(1), 47-60.
- Mostafa RM, Mostafa YM, Ennaceur A (2002) Effects of exposure to extremely low-frequency magnetic field of 2 G intensity on memory and corticosterone level in rats. *Physiology and Behavior* **76**(4-5), 589-595.
- Muhelm R, Edgar NM, Sloan KA, Phillips JB (2006) Magnetic compass orientation in C57BL/6J mice. *Learning and Behavior* **34**(4), 366-373.

- Nguyen DH, Richard L, Burchard JF, Block E (1995) 'An electric and magnetic field exposure chamber for studies of biological effects on dairy cows.' (Frederick MD: W/L Associates, Ltd.: Palm Springs, CA.) 15 pp
- Norell RJ, Gustafson RJ, Appleman RD Behavioral studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. In 'Winter Meeting of American Society of Agricultural Engineers.', 1982, Chicago, IL, USA,
- Olton DS, Samuelson RJ (1976) Remembrance of places passed: Spatial memory in rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes* **2**(2), 97-116.
- Ono D, Honma S, Honma KI (2013) Cryptochromes are critical for the development of coherent circadian rhythms in the mouse suprachiasmatic nucleus. *Nature Communications* **4**, 1666.
- Parreno A, Saraza ML, Mercader J, Delgado JMR (1984) Reduction of plasma gamma-globulin in rats exposed to weak electromagnetic fields. *IRCS Medical Science* **12**(12), 1092-1092.
- Pauls S, Foley N, Foley D, LeSauter J, Hastings M, Maywood E, Silver R (2014) Differential contributions of intra-cellular and inter-cellular mechanisms to the spatial and temporal architecture of the suprachiasmatic nucleus circadian circuitry in wild-type, cryptochrome-null and vasoactive intestinal peptide receptor 2-null mutant mice. *European Journal of Neuroscience* **40**(3), 2528-2540.
- Petit-Demouliere B, Chenu F, Bourin M (2005) Forced swimming test in mice: a review of antidepressant activity. *Psychopharmacology* **177**(3), 245-255.
- Phillips DSM, Parkinson RDJ (1963) The effects of small voltages on milking plants; their detection and elimination. *Dairyfarming Annual, New-Zealand*, 79-90.
- Phillips JB, Muheim R, Jorge PE (2010) A behavioral perspective on the biophysics of the light-dependent magnetic compass: A link between directional and spatial perception? *Journal of Experimental Biology* **213**(19), 3247-3255.
- Podda MV, Leone L, Barbati SA, Mastrodonato A, Li Puma DD, Piacentini R, Grassi C (2013) Extremely low-frequency electromagnetic fields enhance the survival of newborn neurons in the mouse hippocampus. *European Journal of Neuroscience* **39**(6), 893-903.
- Portet R, Cabanes J, Perre J, Delost H (1984) Development of young rabbit exposed to an intense electric field. *Comptes Rendus des Séances de la Société de Biologie et de ses Filiales* **178**(2), 142-152.
- Preston-Martin S, Navidi W, Thomas D, Lee PJ, Bowman J, Pogoda J (1996) Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *American Journal of Epidemiology* **143**(2), 105-119.
- Québec Indspd (2006) 'Exposition aux champs électromagnétiques: mise à jour des risques pour la santé et pertinence de la mise en oeuvre du principe de précaution.' (Institut national de santé publique du Québec, Direction Risques Biologiques, Environnementaux et Occupationnels) pp 128
- Raleigh RJ (1988) 'Joint HVDC Agricultural Study: Final Report.' (Portland, Oregon. US Dep. Energy: Oregon State University, Eastern Oregon Agricultural Research Center, Central Oregon Experiment Station)
- Raoul D (2010) 'Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension.' (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques: Sénat, France) pp177
- Reinemann DJ, Rasmussen MD, LeMire SD (2002) Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **45**(3), 833-838.
- Reinemann DJ, Stetson LE, Laughlin NE, LeMire SD (2005) Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **48**(1), 385-392.

- Reinemann DJ, Stetson LE, Reilly JP, Laughlin NK (1999) Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **42**(1), 215-222.
- Reinemann DJ, Wiltbank MC, Rasmussen MD, Sheffield LG, LeMire SD (2003) Comparison of behavioral to physiological response of cows exposed to electric shock. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **46**(2), 507-512.
- Reiter RJ, Tan DX, Poeggeler B, Kavet R (1998) Inconsistent Suppression of Nocturnal Pineal Melatonin Synthesis and Serum Melatonin Levels in Rats Exposed to Pulsed DC Magnetic Fields. *Bioelectromagnetics* **19**(5), 318-329.
- Reyes-Guerrero G, Vázquez-García M, Elias-Viñas D, Donatti-Albarrán OA, Guevara-Guzmán R (2006) Effects of 17 b-estradiol and extremely low-frequency electromagnetic fields on social recognition memory in female rats: A possible interaction? *Brain Research* **1095**(1), 131-138.
- Rigalma K (2009) 'Effets des courants électriques parasites chez les ruminants, en conditions d'élevage.' (Thèse de doctorat. Thèse AgroParisTech, spécialité Sciences Animales. Paris) 198 pp
- Rigalma K, Duvaux-Ponter C, Barrier A, Charles C, Ponter AA, Deschamps F, Roussel S (2010) Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology, and milk production and composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science* **93**(8), 3542-3552.
- Rigalma K, Duvaux-Ponter C, Gallouin F, Roussel S (2009) Stray voltage in farm animals. *INRA Productions Animales* **22**(4), 291-302.
- Ritz T, Adem S, Schulten K (2000) A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal* **78**(2), 707-718.
- Robert S, Godcharles L, Matte J, Bertin-Mathieux J, Martineau G Les tensions parasites chez le porcs d'engraissement. In 'Journée Recherche Porcine en France', 1993, Paris, pp. 83-90
- Robert S, Matte J, Bertin-Mahieux J (1992a) Stray-voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Canadian Journal of Animal Science* **72**, 467-475.
- Robert S, Matte JJ, Bertin-Mahieux J, Martineau GP (1991) Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Canadian journal of veterinary research = Revue canadienne de recherche veterinaire* **55**(4), 371-376.
- Robert S, Matte JJ, Bertin-Mahieux J, Martineau GP (1992b) Stray voltage: effects of voltage frequency, floor materials and wetness on electric currents trough swine. *Canadian Agricultural Engennering* **36**, 37-43.
- Robert S, Matte JJ, Martineau GP (1996) Sensitivity of reproducing sows and suckling pigs to stray voltage. *American Journal of Veterinary Research* **57**(8), 1245-1249.
- Roda O, Garzón I, Carriel V, Alaminos M, Sánchez-Montesinos I (2011) Biological effects of low-frequency pulsed magnetic fields on the embryonic central nervous system development. a histological and histochemical study. *Histology and Histopathology* **26**(7), 873-881.
- Rodriguez M, Petitclerc D, Burchard JF, Nguyen DH, Block E (2004) Blood melatonin and prolactin concentrations in dairy cows exposed to 60 Hz electric and magnetic fields during 8 h photoperiods. *Bioelectromagnetics* **25**(7), 508-515.
- Rodriguez M, Petitclerc D, Burchard JF, Nguyen DH, Block E, Downey BR (2003) Responses of the estrous cycle in dairy cows exposed to electric and magnetic fields (60 Hz) during 8-h photoperiods. *Animal Reproduction Science* **76**(1-2), 11-20.
- Rodriguez M, Petitclerc D, Nguyen DH, Block E, Burchard JF (2002) Effect of electric and magnetic fields (60 Hz) on production, and levels of growth hormone and insulin-like growth factor 1, in lactating, pregnant cows subjected to short days. *Journal of Dairy Science* **85**(11), 2843-2849.
- Rogers LE, Warren JL, Hins NR, Gano KA, Fitzner RE, Piepel GF (1982) 'Environmental Studies of a 1100 kV prototype transmission line, an annual report for the 1981 study period.' (Rept. to US Dept. Energy by Battelle Pacific North West Laboratories)

- Rogers WR, Reiter RJ, Smith HD, Barlow-Walden L (1995) Rapid-onset/offset, variably scheduled 60 Hz electric and magnetic field exposure reduces nocturnal serum melatonin concentration in nonhuman primates. *Bioelectromagnetics Suppl 3*, 119-122.
- Ruan GX, Gamble KL, Risner ML, Young LA, McMahon DG (2012) Divergent roles of clock genes in retinal and suprachiasmatic nucleus circadian oscillators. *PLoS ONE 7*(6), e38985.
- Rubin EB, Shemesh Y, Cohen M, Elgavish S, Robertson HM, Bloch G (2006) Molecular and phylogenetic analyses reveal mammalian-like clockwork in the honey bee (*Apis mellifera*) and shed new light on the molecular evolution of the circadian clock. *Genome Research 16*(11), 1352-1365.
- Salehi I, Sani KG, Zamani A (2013) Exposure of rats to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) alters cytokines production. *Electromagnetic Biology and Medicine 32*(1), 1-8.
- Salzinger K, Freimark S, McCullough M, Phillips D, Birenbaum L (1990) Altered operant behavior of adult rats after perinatal exposure to a 60-Hz electromagnetic field. *Bioelectromagnetics 11*(2), 105-116.
- Sancar A (2004) Regulation of the mammalian circadian clock by cryptochrome. *Journal of Biochemical Chemistry 279*, 34079-34082.
- Schoenfeld ER, Henderson K, O'Leary E, Grimson R, Kaune W, Leske MC (1999) Magnetic field exposure assessment: A comparison of various methods. *Bioelectromagnetics 20*(8), 487-496.
- Schulten K, Swenberg C, Weller A (1978) A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion. *Zeitschrift für Physikalische Chemie 111*, 1-5.
- Sedghi H, Zare S, Hayatgeibi H, Alivandi S, Ebadi AG (2006) Biological effects of power frequency magnetic fields on serum biochemical parameters in Guinea pigs. *Pakistan Journal of Biological Sciences 9*(6), 1083-1087.
- Selaković V, Rauš Balind S, Radenović L, Prolić Z, Janać B (2013) Age-Dependent Effects of ELF-MF on Oxidative Stress in the Brain of Mongolian Gerbils. *Cell Biochemistry and Biophysics 66*(3), 513-521.
- Selmaoui B, Touitou Y (1999) Age-related differences in serum melatonin and pineal NAT activity and in the response of rat pineal to a 50-Hz magnetic field. *Life Sciences 64*(24), 2291-2297.
- Seong Y, Moon J, Kim J (2014) Egr1 mediated the neuronal differentiation induced by extremely low-frequency electromagnetic fields. *Life Sciences 102*(1), 16-27.
- Shafey TM, Aljumaah RS, Swillam SA, Al-mufarrej SI, Al-abdullatif AA, Ghannam MM (2011) Effects of short term exposure of eggs to magnetic field before incubation on hatchability and post-hatch performance of meat chickens. *Saudi Journal of Biological Sciences 18*(4), 381-386.
- Sienkiewicz ZJ, Bartram R, Haylock RGE, Saunders RD (2001) Single, Brief Exposure to a 50 Hz Magnetic Field Does Not Affect the Performance of an Object Recognition Task in Adult Mice. *Bioelectromagnetics 22*(1), 19-26.
- Sienkiewicz ZJ, Haylock RGE, Bartram R, Saunders RD (1998a) 50 Hz Magnetic Field Effects on the Performance of a Spatial Learning Task by Mice. *Bioelectromagnetics 19*(8), 486-493.
- Sienkiewicz ZJ, Haylock RGE, Saunders RD (1996a) Acute exposure to power-frequency magnetic fields has no effect on the acquisition of a spatial learning task by adult male mice. *Bioelectromagnetics 17*(3), 180-186.
- Sienkiewicz ZJ, Haylock RGE, Saunders RD (1998b) Deficits in Spatial Learning after Exposure of Mice to a 50 Hz Magnetic Field. *Bioelectromagnetics 19*(2), 79-84.
- Sienkiewicz ZJ, Larder S, Saunders RD (1996b) Prenatal exposure to a 50 Hz magnetic field has no effect on spatial learning in adult mice. *Bioelectromagnetics 17*(3), 249-252.
- Simkó M, Mattsson MO (2004) Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: Possible immune cell activation. *Journal of Cellular Biochemistry 93*(1), 83-92.

- Southwick LH, Wilson DJ, Sears PM (1992) Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one to two volts of alternating current. *Journal of the American Veterinary Medical Association* **201**(3), 441-444.
- Steenhof K, Kochert MN, Roppe JA (1993) Nesting by raptors and common ravens on electrical transmission line towers. *Journal of Wildlife Management* **57**(2), 271-281.
- Stetson L, Beccard A, De Shazer J Stray voltage in a swine farrowing unit- a case study. In 'American Society of Agricultural Engineers, 1979 Winter meeting ', 1979, New Orleans Louisiana - USA,
- Stetson L, Beccard A, De Shazer J (1981) Stray voltage in a swine farrowing unit - a case study. *Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers* **24**, 1062-1064.
- Stormshak F, Bracken TD, Carey M, Chartier V, Dickson L, Forbes R, Thompson J (1993) Joint HVAC Transmission EMF Environmental Study, Final Report on Experiment 2. .
- Swerdlow AJ (2006) 'Power frequency electromagnetic fields, melatonin and the risk of breast cancer.' (Health Protection Agency, UK) pp180
- Szemerszky R, Zelena D, Barna I, Bárdos G (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.
- Takao K, Miyakawa T (2006) Light/dark transition test for mice. *Journal of Visualized Experiments* **1**, e104.
- Terol FF, Panchon A (1995) Exposure of domestic quail embryos to extremely low frequency magnetic fields. *International Journal of Radiation Biology* **68**(3), 321-330.
- Thalau P, Ritz T, Burda H, Wegner RE, Wiltshko R (2006) The magnetic compass mechanisms of birds and rodents are based on different physical principles. *Journal of the Royal Society Interface* **3**(9), 583-587.
- Thompson JM, Stormshak F, Lee Jr JM, Hess DL, Painter L (1995) Cortisol secretion and growth in ewe lambs chronically exposed to electric and magnetic fields of a 60-Hertz 500-kilovolt AC transmission line. *Journal of animal science* **73**(11), 3274-3280.
- Tomás G, Barba E, Merino S, Martínez J (2012) Clutch size and egg volume in great tits (*Parus major*) increase under low intensity electromagnetic fields: A long-term field study. *Environmental Research* **118**, 40-46.
- Touitou Y (2011) Internal clock desynchronization, light and melatonin. *Bulletin de l'Academie nationale de medecine* **195**(7), 1527-1546.
- Touitou Y, Selmaoui B (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.
- Ubeda A, Leal J, Trillo MA, Jimenez MA, Delgado JM (1983) Pulse shape of magnetic fields influences chick embryogenesis. *Journal of Anatomy* **137**(3), 513-536.
- Ubeda A, Trillo MA, Chacón L, Blanco MJ, Leal J (1994) Chick embryo development can be irreversibly altered by early exposure to weak extremely-low-frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics* **15**(5), 385-398.
- Vanderstraeten J (2013) 'Analyse de l'hypothèse de la perturbation des biorythmes par les champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence. Mécanismes possibles, impact en santé publique. Protocoles de mise à l'épreuve.' (Doctorat en Sciences de la santé publique. Université Libre Bruxelles, Ecole de santé publique.) pp164
- Vanderstraeten J, Verschaeve L, Burda H, Bouland C, de Brouwer C (2012) Health effects of extremely low-frequency magnetic fields: Reconsidering the melatonin hypothesis in the light of current data on magnetoreception. *Journal of Applied Toxicology* **32**(12), 952-958.

- Vazquez-Garcia M, Elias-Vinas D, Reyes-Guerrero G, Dominguez-Gonzalez A, Verdugo-Diaz L, Guevara-Guzman R (2004) Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields improves social recognition in male rats. *Physiology & behavior* **82**(4), 685-690.
- Vijayalaxmi, Prihoda TJ (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 M, Ambrosini MV, Moretti M, Dominici L, Taha E, Piobbico D, Gambelunghe C, Mariucci G (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.
- Vistnes AI, Ramberg GB, Bjørnevik LR, Tynes T, Haldorsen T (1997) Exposure of Children to Residential Magnetic Fields in Norway: Is Proximity to Power Lines an Adequate Predictor of Exposure? *Bioelectromagnetics* **18**(1), 47-57.
- Vollrath L (2001) Biology of the Pineal Gland and Melatonin in Humans. In 'The Pineal Gland and Cancer.' pp. 5-49. (Springer Berlin Heidelberg)
- Walker MM, Kirschvink JL, Ahmed G, Dizon AE (1992) Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *Journal of Experimental Biology* **171**, 67-78.
- Wang Y, Pan Y, Parsons S, Walker M, Zhang S (2007) Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **274**(1627), 2901-2905.
- Ware BJ (1974) 'Effect of 765-kV transmission lines on animal grazing habits.' (Am. Electric Power Serv. Corp., New York, NY (1974))
- Wertheimer N, Leeper E (1979) Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology* **109**(3), 273-284.
- Whishaw IQ, Tomie JA (1987) Cholinergic Receptor Blockade Produces Impairments in a Sensorimotor Subsystem for Place Navigation in the Rat: Evidence From Sensory, Motor, and Acquisition Tests in a Swimming Pool. *Behavioral Neuroscience* **101**(5), 603-616.
- Whittlestone WG, Mullord MM, Kilgour R, Cate LR (1975) Electric shocks during machine milking. *New Zealand Veterinary Journal* **23**(6), 105-108.
- WHO (2007) 'Extremely low frequency fields, environmental health criteria 238.' (World Health Organization: Geneva, Switzerland) 347-355
- Williams JH, Beiler JE (1979) 'An investigation of dairy farm operations in association with 765-kV transmission in Ohio.' (Ohio Power Siting Commission and Cleveland Electric Illuminating Company: Cleveland, OH.)
- Wilson DJ, Southwick LH, Kaeser DR (1996) Improvement in milk production and udder health following correction of stray voltage on computer feeders. *Agri-Practice (USA)* **17**, 24-29.
- Wiltschko R, Wiltschko W (1995) 'Magnetic orientation in animals.' (Springer: Berlin, Heidelberg, New York) 297pp.
- Wiltschko W, Dehe L, Stapput K, Thalau P, Wiltschko R (2010) Magnetoreception in birds: No intensity window in "fixed direction" responses. *Naturwissenschaften* **97**(1), 37-42.
- Wiltschko W, Freire R, Munro U, Ritz T, Rogers L, Thalau P, Wiltschko R (2007) The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. *Journal of Experimental Biology* **210**(13), 2300-2310.
- Wiltschko W, Stapput K, Thalau P, Wiltschko R (2006) Avian magnetic compass: Fast adjustment to intensities outside the normal functional window. *Naturwissenschaften* **93**(6), 300-304.
- Wiltschko W, Wilschko R (1995) Migratory orientation of European robins is affected by the wavelength of light as well as a magnetic pulse. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* **177**(3), 363-369.
- Wiltschko W, Wiltschko R, Ritz T The mechanism of the avian magnetic compass. In '22nd Solvay Conference on Chemistry - Quantum Effects in Chemistry and Biology', 2011, Brussels, pp. 276-284

- Winker R, Ivancsits S, Pilger A, Adlkofer F, Rudiger HW (2005) Chromosomal damage in human diploid fibroblasts by intermittent exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* **585**(1-2), 43-49.
- Wolf FI, Torsello A, Tedesco B, Fasanella S, Boninsegna A, D'Ascenzo M, Grassi C, Azzena GB, Cittadini A (2005) 50-Hz extremely low frequency electromagnetic fields enhance cell proliferation and DNA damage: Possible involvement of a redox mechanism. *Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Cell Research* **1743**(1-2), 120-129.
- Woolford MW Small voltage in milking plants. In '2nd Seminar on Farm Machinery and Equipment', 1972, Wellington, New Zealand, p. 41
- Wright R, Ackerman C, Spray R (1985) Stray electricity in swine units. *Animal Health and Nutrition*, 18-20.
- Yellon SM (1994) Acute 60 Hz magnetic field exposure effects on the melatonin rhythm in the pineal gland and circulation of the adult Djungarian hamster. *Journal of Pineal Research* **16**(3), 136-144.
- Yellon SM (1996) 60-Hz magnetic field exposure effects on the melatonin rhythm and photoperiod control of reproduction. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism* **270**(5), e816-e821.
- Yellon SM, Hilliker S (1994) Influence of acute melatonin treatment and light on the circadian melatonin rhythm in the Djungarian hamster. *Journal of Biological Rhythms* **9**(1), 71-81.
- Yellon SM, Truong HN (1998) Melatonin Rhythm Onset in the Adult Siberian Hamster: Influence of Photoperiod but Not 60-Hz Magnetic Field Exposure on Melatonin Content in the Pineal Gland and in Circulation. *Journal of Biological Rhythms* **13**(1), 52-59.
- Youbicier-Simo BJ, Boudard F, Cabaner C, Bastide M (1997) Biological Effects of Continuous Exposure of Embryos and Young Chickens to Electromagnetic Fields Emitted by Video Display Units. *Bioelectromagnetics* **18**(7), 514-523.
- Zhadin MN, Deryugina ON, Pisachenko TM (1999) Influence of combined DC and AC magnetic fields on rat behavior. *Bioelectromagnetics* **20**(6), 378-386.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2013 -SA- 0 0 3 7



COURRIER ARRIVE

27 FEV. 2013

DIRECTION GENERALE

MINISTERE DES AFFAIRES
SOCIALES ET DE LA SANTE

Direction générale de la santé

MINISTERE DU TRAVAIL, DE
L'EMPLOI, DE LA FORMATION
PROFESSIONNELLE ET DU
DIALOGUE SOCIAL

Direction générale du travail

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU
DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE
L'ENERGIEDirection générale de la prévention
des risquesDirection générale de l'énergie et du
climatMINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE
L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA
FORET

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

Annexe 2 : Précautions et exigences pour les mesures de champs électriques de basse fréquence (Communication F. Deschamps, RTE)

La mesure du champ électrique nécessite un très grand soin, le résultat étant influencé par de nombreux paramètres. Les plus importants facteurs d'influence sont les suivants :

- effet de proximité de l'opérateur,
- influence du trépied,
- humidité,
- température,
- non uniformité du champ

Les mesures doivent être effectuées à une hauteur représentative de l'exposition du corps humain. Les normes de mesures (CEI 62110) préconisent une hauteur de 1 m au dessus du sol.

1. Précautions essentielles

1.1 Utilisation d'un support isolant pour la sonde

Pour que la hauteur de la sonde au-dessus du sol reste constante, la sonde de mesure du champ doit être soutenue par **un support isolant** n'affectant pas la mesure (le plus souvent un trépied). Si le support est indispensable, c'est aussi l'une des principales sources d'erreurs de mesure des champs électriques. Des recommandations permettant d'éviter ces erreurs sont données ci-dessous.

Les sondes positionnées à l'extrémité d'une perche isolante tenue à la main (voir Figure A) peuvent fournir des résultats non biaisés si la longueur de la perche est supérieure à 1,5 m. Néanmoins, il est nécessaire de tenir compte du fait que ces mesures sont moins précises et moins reproductibles en termes de positionnement de la sonde (hauteur et emplacement).



Figure A : mesure d'un champ électrique à l'aide d'une perche tenue à la main

Notons enfin qu'il existe sur le marché des mesureurs de champs électriques pouvant être tenus en main. Dans le domaine des basses fréquences, ces instruments fournissent des résultats peu précis et peu reproductibles. Ils peuvent être utilisés pour une vérification approximative mais absolument pas pour une mesure précise.

1.2 influence du support

Le champ électrique mesuré peut être perturbé par la présence du support isolant (notamment si on utilise un support autre que celui préconisé par le fabricant). Pour réduire ce problème potentiel, il est possible d'éloigner la sonde de l'axe vertical du support en la déportant grâce à une perche additionnelle fixée sur le support.

Les mesures peuvent être influencées par le matériau utilisé pour le support isolant : le fait que ce soit un isolant électrique ne suffit pas à garantir des mesures correctes, et il faut veiller à ce que la permittivité de ce matériau soit proche de celle de l'air.

Cela est particulièrement important pour les procédures d'étalonnage : pour des raisons pratiques, le support utilisé pendant l'étalonnage peut être différent de celui utilisé pendant les mesures (et/ou le support n'est pas utilisé dans les mêmes conditions). Un facteur de correction peut être appliqué pour tenir compte de cet effet possible. Sinon, une incertitude de mesure supplémentaire doit être appliquée.

1.3 Effets de proximité de l'opérateur

La plupart des instruments de mesure des champs électriques de basse fréquence se composent de deux parties : la sonde et le boîtier de mesure, fonctionnant sur batterie et dans la plupart des cas reliés par fibre optique. Cela permet de limiter l'influence de l'opérateur sur le champ à mesurer. La mesure doit être effectuée de façon à réduire à un niveau acceptable les interactions provoquées par l'opérateur et les objets situés près de la sonde. L'opérateur doit se positionner à distance suffisante de la sonde de mesure (minimum 1,5 m et recommandée 3 m).

Remarque : pour éviter les biais provoqués par l'opérateur, une astuce pratique (facile à appliquer avec un appareil à fibre optique) consiste à s'éloigner de plus en plus de la sonde jusqu'à ce que les résultats des mesures ne soient plus affectés par l'opérateur.

1.4 de la sonde par rapport au terrain et aux objets environnants

Dans la mesure du possible, l'endroit choisi pour la mesure doit être plat et dégagé, c'est-à-dire dépourvu d'arbre, d'herbe haute, de clôture, de bâtiment ou autre obstacle. Tous les objets déplaçables doivent être retirés lorsque cela est possible. Sinon, la distance avec la sonde doit correspondre à au moins trois fois la hauteur de l'objet (objet non permanent) ou à 1 m (objet permanent). Les objets/obstacles ne pouvant pas être retirés doivent être listés, en indiquant leurs dimensions et leur emplacement.

1.5 Humidité et température

L'humidité peut influencer les systèmes de mesure des champs électriques, lorsqu'elle est suffisamment abondante pour produire de la condensation sur le capteur et sur la structure de support (trépied). En particulier, tenant compte de la sensibilité relativement élevée du bois à l'humidité, les supports en bois non vernis devraient être évités en conditions de forte humidité relative. Des tests effectués en chambre climatique ont établi que la mesure des champs électriques peut être affectée de façon importante lorsque l'humidité relative dépasse les 70 % environ.

A noter que les erreurs entraînées par la présence d'humidité sur le support ou la sonde sont **toujours des erreurs par excès** puisque le support se comporte alors comme un objet conducteur amplifiant localement le champ par effet de pointe. Lorsqu'une perche supplémentaire est utilisée pour décaler horizontalement le capteur par rapport au trépied, l'erreur de mesure résultant de l'effet d'humidité est diminuée.

Dans tous les cas, lorsque des mesures précises sont nécessaires, **il est nécessaire de mesurer l'humidité relative de l'air** afin de vérifier que la préconisation d'humidité relative inférieure à 70 % est respectée.

Des conditions de forte humidité sont habituelles dans certaines régions. Dans ces conditions, il est nécessaire de porter une attention particulière à la préparation du matériel de mesure et notamment d'éviter la formation de condensation. Par exemple, si la température de l'appareil est supérieure à la température ambiante, aucune condensation ne se produit.

En cohérence avec les considérations précédentes, **il est impossible de mesurer les champs électriques avec fiabilité en cas de pluie.**

2. Recommandations complémentaires

2.1 Enregistrement de l'heure et date des mesures : recommandé

Dans la durée d'une campagne de mesure autour d'un ouvrage à haute tension, le champ électrique peut varier, même si c'est dans des proportions bien moindres que les variations potentielles du champ magnétique. En l'occurrence, la tension ne varie pas et le seul paramètre variable est la hauteur des conducteurs par rapport au sol, hauteur qui varie en fonction de la température des conducteurs, température qui elle-même dépend du courant qui circule (et chauffe les conducteurs par effet Joule) et des

conditions environnementales (température ambiante, ensoleillement et vent). Toutes ces variations restent faibles et d'évolution lente. Par conséquent, l'enregistrement de l'heure précise de chaque mesure de champ électrique n'est pas absolument nécessaire, mais est cependant conseillé si une analyse fine est à faire.

Si on est amené à réaliser plusieurs mesures de champ électrique au même point mais à différents moments de la journée, il est utile de mesurer simultanément le champ magnétique qui pourra donner des indications sur la variation du courant dans la ligne. Cette double mesure est possible avec de nombreux appareils disponibles sur le marché.

2.2 Mesure de la hauteur des conducteurs par rapport au sol : très recommandé

Cette mesure peut être réalisée au moyen d'appareils à visée laser ou télémétrique. Elle peut nécessiter un certain entraînement car il n'est pas facile de repérer à coup sûr le bon conducteur (en clair : le plus bas) et qui plus est, celui-ci peut bouger sous l'action du vent.

L'intérêt de cette mesure particulière est qu'elle permet d'expliquer d'éventuels écarts (par exemple quand plusieurs mesures sont faites au même point mais à des moments différents) et permet aussi un certain contrôle de cohérence pour les techniciens expérimentés : par exemple, si on mesure une valeur de champ très élevée alors que la ligne est très haute, il y a forcément un problème.

2.3 Enregistrement des facteurs environnementaux : optionnel si la hauteur des conducteurs est déjà mesurée

La température de l'air, le vent et le transit dans la ligne déterminent la température du conducteur et affectent donc la flèche de la ligne et la hauteur des conducteurs par rapport au sol. Par conséquent, les champs électriques mesurés à un point particulier peuvent varier d'un moment à l'autre, si l'un ou l'autre des paramètres précités varie également. Il est donc important d'enregistrer les paramètres météorologiques.

Annexe 3 : Résultats détaillés de la CRD

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (μT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)	CM 50 Hz Intérieur (μT)	Equipement source de champs	Valeur large bande max (μT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min				
3	PC	Ligne THT 225 kV	105 m	46,3	4,88	0,31	0,02	0,39 à 1,1	0 à 0,01	Machine à soupe	0,09	0,3	1,5
										Plaque chauffante	0,85	0,3	1,1
										Distributeur automatique de concentré	0,30	0,3	1,7
										Chauffage	1,33	0,3	1,7
										Armoire électrique	1,63	0,7	1,7
										Vis d'alimentation	1,79	0,3	1,7
										Compresseur	2,18	0,3	1,1
										Laveur haute pression	0,12	0,3	1,1
										Centrifugeuse	5,69	0,3	1,5
8	BV	Ligne THT 225 kV	100 m	1485 à 1886	0,22	3,17	0,01	0,19 à 0,65	0,02 à 0,03	Robot de traite	0,25	0,3	0,65
										Chaîne de curage	0,74	0,3	0,75
										Hacheur/mélangeur de la fosse à lisier	0,39	0,6	0,75
										Chauffe eau	0,05	0,3	1,1
										Ventilateur réfrigérant	0,65	0,3	1,35
										Surpresseur (m1)	3,63	0,3	1,45
										Surpresseur (m2)	0,25	1	1,45
										Eclairage stabulation	0,63	0,55	1,5
										Armoire électrique (m1)	2,36	0,3	1,1
										Armoire électrique (m2)	0,33	1	1,1
14	PC	Ligne THT 400 kV (400/400) bâtiment engraissement sous la ligne	0 m	2562 à 2814	3,21	2,78	0,01	0,29 à 6,78	0,02 à 2,01	Machine à soupe	2,17	0,3	0,6
		Ligne 63 kV	35 m							Armoire électrique	0,35	0,3	1,55
		Laveur haute pression	1,00							0,3	0,64		
		Ventilateur	0,04							0,3	1,83		
		Chaîne d'alimentation	0,16							0,9	1,83		

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min	Max					
17	VL	Ligne THT 400 kV (400/400)	215 m	1230 à 3262 ²	6,05	1,87	0,05	0,02 à 0,05	0,04 à 0,06	Climatiseur	0,24	0,3	1,84		
										Armoire électrique et variateur de lumière	0,14	0,55	1,7		
										Chaîne d'alimentation	0,29	0,3	0,54		
										Néon	0,08	0,31	1,87		
										Tapis à oeufs	0,29	0,3	0,54		
18	VL	Ligne HT 90 kV	191 m	320 à 404	3,11	0,47	0,01	0,31 à 1,39	0,01	Climatiseur	0,62	0,3	1,56		
										Armoire électrique	0,32	0,3	1,74		
										Pompe d'alimentation en eau (m1)	1,78	0,37	1,36		
		Ligne THT 400 kV (400/400)	280 m	664 à 764	Pompe d'alimentation en eau (m2)	0,27	1	1,36							
					Variateur éclairage	0,21	0,3	1,4							
					Chaîne d'alimentation (m1)	2,71	0,3	0,15							
					Chaîne d'alimentation (m2)	0,04	1	0,15							
					Vis d'alimentation des coquilles d'huître (m1)	5,04	0,3	1,82							
					Vis d'alimentation des coquilles d'huître (m2)	0,23	1	1,82							
Vis d'alimentation du grain	0,59	0,45	1,76												
9	VL	Ligne THT 400 kV (400/400)	136 m	2107 à 2275	4,88	2,45	0,03	0,04 à 3,09	0,03 à 0,09	Armoire électrique	0,29	0,3	1,75		
										Vis d'alimentation	0,96	0,3	0,3		
										Clôture électrique	0,11	0,3	0,55		
										Climatiseur	0,43	0,3	1,5		
										Chauffe eau	0,09	0,35	1,8		
										Armoire électrique	0,35	0,3	1,8		
										Néon	0,15	0,6	1,8		
										Chaîne d'alimentation	0,35	0,5	0,6		

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)		
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min	Max							
10	VL	Ligne THT 400 kV (400/400) à 24 m de la cellule 2 et à 107 m de la cellule 1	24 m	1119 à 6885 ²	59,45	7,59	0,27	0,11 à 1,06	0,33 à 2,97	Vis d'alimentation (m1)	1,22	0,3	0,6	Vis d'alimentation (m2)	0,29	1	0,6
		Ligne HT 90 kV à 93 m de la cellule 2	93 m	Néon	0,45	0,47	1,9										
								Chauffe eau	0,31	0,3	1,55						
6	PC	Ligne THT 225 kV à 14 m	14 m	846	3,32	1,13	0,04					0,07 à 5,94	0,05 à 0,53	Machine à soupe	0,57	0,3	1,1
								Chauffage	0,64	0,3	1,7						
		Ligne THT 225 kV à 47 m du site	47 m	Ventilateur extracteur	0,57	0,3	1,7										
		Plaquette chauffante au sol			0,48	0,3	1,7										
		Armoire électrique			0,82	0,3	1,5										
		Chauffe eau			0,83	0,3	1,7										
		Armoire électrique			0,13	0,3	1,83										
Tank à lait	0,26	0,83	1,83														
Néons tue mouche	0,15	0,66	1,66														
Néon	0,18	0,47	1,92														
19	BV	Ligne THT 400 kV (400/400) à 39 m du hangar abritant le matériel agricole et à 77 m du fond de la zone d'attente de l'entrée à la salle de traite	77 m	574 à 1978	47,1	3,46	0,13	0,01 à 0,36	0,13 à 0,22	Alimentation de la clôture électrique	0,39	0,4	1,82	Chauffe eau	0,14	0,44	0,6
										Surpresseur	2,22	0,3	1,6				
										Pompe à vide pour la traite du lait	2,28	0,3	0,2				
										Refroidisseur du tank à lait	0,14	0,3	1,33				

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min						
20	BV	Ligne THT 225 kV, à 22 m du bâtiment d'élevage	22 m	2398 à 2648	24,96	3,82	0,06	0,02 à 43,4	0,09 à 0,76	Refroidisseur du tank à lait	0,41	0,5	0,88		
										Brasseur du tank à lait	0,51	0,9	1,92		
										Néon, éclairage salle de traite	0,09	1,04	1,88		
										Armoire électrique	0,31	0,3	0,9		
										Pompe à vide	0,94	0,3	0,75		
22	BV	Ligne THT 400 kV (400/400) à 36 m de la salle de traite	36 m	2249 à 2587	0,54	3,96	0,24	0,54 à 2,30	0,24 à 1,06	Refroidisseur du tank à lait	2,22	0,42	0,74		
										Pompe à vide (m1)	1,20	0,3	0,55		
										Pompe à vide (m2)	1,18	1	0,55		
										Pompe à vide (m3)	1,22	1,5	0,55		
										Brasseur du tank à lait	0,98	0,74	1,68		
										Chauffe eau (m1)	1,05	0,3	0,24		
										Chauffe eau (m2)	1,02	1	0,24		
										Chauffe eau (m3)	0,98	1,5	0,24		
										Armoire électrique (m1)	1,10	0,3	1,4		
										Armoire électrique (m2)	1,00	1	1,4		
										Armoire électrique (m3)	0,99	1,5	1,4		
										Commande du chien électrique	0,94	0,41	1,33		
Néon	0,91	0,48	1,92												
24	BV	Ligne THT 400 kV (400/400) à 116 m du bâtiment de traite	116 m	4227 à 6309 ²	1,23	3,75	0,09	0,01 à 1,41	0,09 à 0,11	Brasseur du tank à lait	0,49	0,83	1,91		
		Ligne THT 225 kV à 170 m du bâtiment de traite	170 m	1083 à 1612 ²						Pompe à vide de la machine à traire	1,04	0,3	0,58		
		Ligne 63 kV	> 200 m							Chauffe eau	0,17	0,3	0,74		
										Pompe à lait (m1)	2,95	0,3	0,22		
										Pompe à lait (m2)	0,19	1	0,22		
									Néon, éclairage de la stabulation	0,11	0,72	1,91			

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)	CM 50 Hz Intérieur (µT)	Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)	
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min					
25	BV	Ligne THT 400 kV (400/400) à 42 m de la stabulation	42 m	1590 à 1692	0,01	3,94	0,13	0,01 à 20,55	0,18 à 0,56	Pompe à vide	0,40	0,3	0,57	
										Armoire électrique	0,14	0,3	1,52	
										Pompe à lait (m1)	9,17	0,3	0,59	
		Ligne THT 225 kV à 17 m de la stabulation	17 m	4827 à 5060							Pompe à lait (m2)	0,53	1	0,59
											Brasseur du tank à lait	0,14	1,1	1,85
											Chauffe eau	0,19	0,3	0,58
									Néon, éclairage de la stabulation	0,19	0,43	1,92		
26	PC	Ligne THT 225 kV à 12 m du bâtiment de post sevrage	12 m	2528 à 8087 ²	28,75	3,7	0,14	0,06 à 2,17	0,05 à 1,17	Broyeur pour l'alimentation (m1)	6,97	0,3	0,57	
										Broyeur pour l'alimentation (m2)	0,55	1	0,57	
										Machine à soupe	0,43	0,3	0,23	
										Vis d'alimentation, pastilles	0,58	0,3	0,58	
										Vis d'alimentation du silo	0,64	0,42	1,85	
		Ligne THT 225 kV à 146 m du bâtiment de postsevrage	146 m								Armoire électrique (m1)	4,85	0,3	1,5
											Armoire électrique (m2)	0,41	1	1,5
											Chauffage maternité	0,08	0,3	0,54
											Ventilateur	0,16	0,3	1,5
											Compresseur (m1)	9,70	0,3	1,13
									Compresseur (m2)	0,72	1	1,13		
27	PC	Ligne THT 400 kV (400/400) à 25 m du quai d'embarquement	25 m	2868 à 3743	296	3,21	0,4	0,28 à 11,03	0,15 à 0,55	Distributeur automatique de concentré	0,28	0,92	1,7	
										Machine à soupe (alimentation en eau et en reste d'aliment) (m1)	18,92	0,3	0,15	
										Machine à soupe (alimentation en eau et en reste d'aliment) (m2)	0,65	1	0,15	
										Machine à soupe (distributeur)	1,42	0,82	1,92	
										Vis d'alimentation du silo (m1)	3,36	0,3	0,59	
										Vis d'alimentation du silo (m2)	0,60	1	0,59	
										Plaque chauffante au sol	0,52	0,15	0,15	

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Max	Min					
30	VL	Ligne 63 kV à 46 m du bâtiment	46 m	178 à 185	0,88	0,01	0	0,07 à 0,51	0	Ventilateur	0,40	0,3	1,5		
										Armoire électrique	0,50	0,53	1,75		
										Laveur haute pression	1,04	0,3	0,56		
										Compresseur	1,97	0,36	1,08		
		Ascenseur à œufs (m1)	1,02	0,42	0,57										
		Ascenseur à œufs (m2)	0,07	1	0,57										
		Moteur des bandes à œufs (m1)	2,96	0,3	1,92										
		Moteur des bandes à œufs (m2)	0,04	0,3	1,92										
		Néons	0,07	0,57	1,92										
		Ventilateur	0,35	0,3	1,83										
		Armoire de commande des bandes à fientes	0,38	0,3	1,54										
		Armoire de régulation des ventilateurs	0,64	0,3	1,48										
		Chaîne d'alimentation	0,19	0,3	1,28										
		Armoire électrique (m1)	7,34	0,3	0,75										
		Armoire électrique (m2)	0,54	1	0,75										
		Table de tri	1,20	0,3	0,92										
Mise des oeufs en alvéoles 2	0,49	0,3	1,18												
Mise des oeufs en alvéoles 1	0,52	0,3	1,18												
Armoire de commande du séchoir	0,98	0,3	1,11												
Néon	0,03	1,93	0,88												
Surpresseur	0,17	0,33	0,87												
Groupe électrogène	1,85	0,55	0,91												

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)	CM 50 Hz Intérieur (µT)	Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min				
1	BV	Ligne HT 90 kV à 130 m du bâtiment	130 m	247	2,18	0,09	0	0,14 à 1,15	0 à 0,07	Refroidisseur du tank à lait	0,14	0,3	1,1
										Pompe à vide	0,33	0,3	1,5
										Compresseur 1 porte salle de traite	1,43	0,3	1,1
										Armoire électrique extérieure	1,14	0,3	1,5
										Sonde d'activité	0,08	0,3	1,5
										Podomètre	0,05	0,3	1,7
										Chaîne de curage	0,27	0,3	1,1
										Compresseur 2 porte salle de traite	0,70	0,3	1,5
2	PC	-	-	-	-	-	-	0,20 à 4,75	0 à 0,01	Alimentation électrique	0,12	0,3	1,5
										Racleur	0,07	0,3	1,5
										Alimentation sèche	0,21	0,3	1,1
										Machine à soupe	0,32	0,3	1,1
										Chauffage	0,25	0,3	1,5
										Distributeur automatique de concentré	0,28	0,3	1,7
										Ventilateur extracteur	0,08	0,3	1,1
										Néon	0,06	0,3	1,7
										Chauffage maternité	0,20	0,3	1,5
16	BV	-	-	0,23	0,01	0,05	0	0,01 à 0,08	0 à 0,01	Agitateur	0,07	0,9	0,77
										Armoire électrique	4,87	0,3	1,66
										Chien électrique	0,27	0,35	1,83
										Lavage du tank à Lait	4,09	0,3	0,57
										Rotaflo	0,07	0,74	0,5
										Refroidisseur du tank à lait	1,27	0,3	0,96
										Pompe à vide	0,70	0,4	0,6
										Compresseur	0,44	0,3	0,74
Chauffe eau	0,55	0,3	0,6										

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min	Max					
15	BV	-	-	0,27	0,03	0,01	0	0 à 2,26	0 à 0,02	Chaîne de curage	0,12	0,3	0,65		
										Armoire de commande du chien électrique	0,05	0,3	0,93		
										Moteur du lavage du tank (m1)	11,02	0,3	0,25		
										Moteur du lavage du tank (m2)	0,25	1	0,25		
										Eclairage stabulation	0,04	0,7	1,83		
										Brosse	0,07	0,43	4,83		
										Boitier de démarrage salle de traite	0,38	0,3	0,92		
										Moteur de la pompe à lait (m1)	1,55	0,5	0,6		
										Moteur de la pompe à lait (m2)	0,97	0,5	1		
										Tank à lait	0,06	1,14	1,9		
										Armoire électrique	0,03	0,3	1,73		
4	PC	-	-	-	-	-	-	0,22 à 27,2	0 à 0,01	Vis d'alimentation des gestantes	0,90	0,3	1,7		
										Ventilateur extracteur	0,16	0,3	1,5		
										Armoire électrique	0,34	0,3	1,7		
										Chauffe eau	0,03	0,3	1,5		
										Radiant	0,16	0,3	1,7		
										Laveur haute pression	0,32	0,3	1,1		
										Armoire électrique	0,14	0,3	1,7		
										Plaque chauffante au sol	0,04	0,3	1,7		
12	VL	-	-	0,03	0,01	0,01	0	0 à 0,08	0	Chaîne d'alimentation	0,17	0,65	0,6		
										Armoire électrique	0,13	0,3	1,55		
										Chauffe eau	0,05	0,3	1,65		
										Néon	0,16	0,46	1,89		
										Néon (grille moustique)	0,36	0,4	1,92		
										Climatiseur	0,45	0,3	1,82		

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min						
13	VL	-	-	14,5	0,05	0		0,03 à 0,07	0		Armoire électrique	0,42	0,3	1,55	
											Néon	0,04	0,9	1,93	
											Pompe	1,53	0,4	0,58	
											Chauffe eau sans cumulus	0,08	0,5	0,7	
											Chaîne d'alimentation	0,05	1,12	1,89	
											Lampe LED	0,04	0,3	1,8	
											Lampe basse consommation (m1)	2,51	0,3	1,8	
											Lampe basse consommation (m2)	0,03	0,3	0,8	
11	VL	Caténaïres à 25 m	-	144	7,75	0,02	0	0,05 à 0,67	0		Armoire électrique	0,17	0,3	1,5	
											Variateur de fréquence pour la lumière (m1)	0,92	0,3	1,73	
											Variateur de fréquence pour la lumière (m2)	0,05	1	1,73	
											Chauffe eau et manomètre	0,03	0,3	0,7	
											Chauffe eau sans cumulus	0,04	0,3	0,6	
											Néon	0,19	0,4	1,9	
											Chaîne d'alimentation (m1)	3,69	0,3	0,6	
											Chaîne d'alimentation (m2)	0,08	1	0,6	
7	PC	-	-	-	-	-	-	2,94 à 0,04	0 à 0,01		Machine à soupe	0,72	1,4	1,1	
											Vis d'alimentation post-sevrage	0,22	0,3	1,5	
											Ventilateur extracteur	1,35	0,3	1,1	
											Chauffage	0,23	0,3	1,7	
											Armoire électrique	1,39	0,3	1,7	
											Chauffe eau	0,09	0,3	1,5	
											Laveur haute pression	0,28	0,3	1,1	

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (μT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)	CM 50 Hz Intérieur (μT)	Equipement source de champs	Valeur large bande max (μT)	D (m)	Hauteur (m)	
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min					
5	PC	-	-	-	-	-	-	0,07 à 2,61	0 à 0,1	Armoire électrique	1,02	0,3	1,7	
										Lampe chauffante	1,02	0,3	1,7	
										Ventilateur extracteur	0,04	0,3	1,1	
										Distributeur automatique de concentré	0,43	0,3	1,5	
										Laveur haute pression	1,03	0,3	1,1	
										Vis d'alimentation (m1)	10,92	0,3	1,1	
										Vis d'alimentation (m2)	2,49	0,3	1,5	
										Vis d'alimentation (m3)	1,49	0,3	1,7	
										Radiant	0,70	0,3	1,5	
										Régulation de la ventilation	1,06	0,3	1,5	
										Eco ventilateur	0,47	0,3	1,7	
21	VL	-			0,19	0,01	2,16	0,46	0,01 à 1,98	0,01 à 0,06	Chaine d'alimentation	0,15	0,4	0,7
											Lampe fluorescente	0,19	0,3	1,07
											Séchoir à fientes	0,07	0,45	0,6
											Armoire électrique	1,94	0,3	1,92
											Tapis à oeufs	1,00	0,3	0,74
											Armoire de commande du robot palette	1,22	0,3	0,8
											Mise des oeufs en alvéoles	0,38	0,3	1,2
											Variateur de fréquence du tapis à oeufs	2,64	0,3	1,41
											Armoire de régulation	0,13	0,3	1,3
											Séchoir à fientes du bâtiment 3	0,64	0,3	0,63
											Ventilateur	0,97	0,3	1,55
											Batterie d'alimentation des clôtures électriques	0,04	0,45	1,41
											Ascenseur à oeufs	0,68	0,3	0,66
											Lampe LED	0,04	0,36	1,8
											Néon	0,12	0,48	1,9
											Chauffe eau	0,09	0,36	1,86
											Electroaimant	0,83	0,3	1,68
											Groupe électrogène (m1)	3,13	0,44	0,91
Groupe électrogène (m2)	0,55	1	0,91											

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (µT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)		CM 50 Hz Intérieur (µT)		Equipement source de champs	Valeur large bande max (µT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min	Max					
23	VL	Couvoir	-	0,11	-	0,01	-	0,01 à 0,92	0,01 à 0,06	Ventilateur brasseur (m1)	7,67	0,3	0,16		
										Ventilateur brasseur (m2)	0,60	0,7	0,16		
										Vis de retournement des oeufs	1,64	0,3	0,16		
										Armoire de commande des incubateurs n°1	0,32	0,3	1,74		
										Armoire de commande des incubateurs n°2	0,06	0,3	1,54		
										Armoire de commande des incubateurs n°3	0,26	0,3	1,9		
										Résistance	0,25	0,3	0,76		
										Moteur hygrométrie (m1)	6,55	0,3	0,19		
										Moteur hygrométrie (m2)	0,23	1	0,19		
										Armoire électrique	0,79	0,3	1,39		
										Armoire électrique (m1)	24,61	0,3	1,4		
										Armoire électrique (m2)	7,09	1	1,4		
										Armoire électrique (m3)	3,51	1,5	1,4		
										Fibre optique testage (m1)	4,78	0,3	1,03		
Fibre optique testage (m2)	0,20	1	1,03												
28	PC	Ligne moyenne tension à 20 m	9,88	1,25	0	-	0 à 4,59	0 à 0,01	Armoire électrique (m1)	5,13	0,3	1,4			
									Armoire électrique (m2)	0,91	1	1,4			
									Compresseur (m1)	7,88	0,3	0,96			
									Compresseur (m2)	0,61	1	0,96			
									Machine à soupe (moteur de distribution avec variateur de fréquence) (m1)	3,39	0,3	0,23			
									Machine à soupe (moteur de distribution avec variateur de fréquence) (m2)	0,08	1	0,23			
									Centrifugeuse à traiter le lisier	0,88	0,58	1,92			
									Vis d'alimentation (vis à pastille)	0,83	0,4	0,69			

Site n°	Espèce animale	Puissance des lignes	Distance lignes /bâtiments d'élevage	CE 50 Hz Extérieur (V/m)		CM 50 Hz Extérieur (μT)		CE 50 Hz Intérieur (V/m)	CM 50 Hz Intérieur (μT)	Equipement source de champs	Valeur large bande max (μT)	D (m)	Hauteur (m)
				Sous la ligne ¹	Min	Max	Min	Max	Min				
29	BV	-	-	0,58	0,5	0,01	0	0,01 à 2,19	0 à 0,01	Vis d'alimentation (vis de distribution)	0,99	0,3	0,58
										Ventilateur	0,09	0,3	1,04
										Chauffage n°1	0,07	0,3	0,6
										Chauffage n°2	0,03	0,3	0,6
										Laveur haute pression	0,92	0,3	1,04
										Seconde machine à soupe (moteur de distribution) (m1)	5,19	0,3	0,2
										Seconde machine à soupe (moteur de distribution) (m2)	0,24	1	0,2
										Tank à lait (ventilateur refrigerant)	0,99	0,3	1,08
										Tank à lait (brasseur)	0,15	0,68	1,64
										Pompe à vide n°1	1,06	0,3	0,73
										Pompe à vide n°2	0,42	0,3	0,7
										Chauffe eau	0,17	0,3	0,57
										Pompe à lait (m1)	2,56	0,45	0,58
										Pompe à lait (m2)	0,74	1	0,58
										Néon éclairage de la salle de traite	0,18	1,33	1,91
Ampoule à incandescence éclairage de la salle de traite	0,03	0,84	1,91										

VL = Volailles ; BV = Bovins ; PC = Porcs

¹ Mesures effectuées exactement sous la ligne HT/THT (aplomb) pour les exploitations situées à proximité d'une ligne, le minimum est donné pour les mesures à l'extérieur des bâtiments à distance des lignes. Pour les exploitations situées loin des lignes HT/THT, les minimum et maximum sont donnés pour les mesures effectuées à l'extérieurs des bâtiments.

² Valeurs de mesures à considérer avec beaucoup de précaution en raison de l'humidité matinale.

Annexe 4 : Tableaux de calcul des incertitudes dans les mesures de CM et CE

Les tableaux suivants donnent les bilans d'incertitude sur les mesures des champs magnétique et électrique à la fréquence 50 Hz dans l'environnement des fermes d'élevage (Tableau 9 et Tableau 10) et large bande 50 Hz-500 Hz à proximité des appareils et machines agricoles (Tableau 11). Ces incertitudes ont été calculées sur une plage de température qui varie entre 10°C et 35°C. Pour le CM (champ H), la composante d'incertitude dominante est liée presque uniquement aux effets de température alors que pour le CE, ce sont les composantes effets de température et le raccordement à l'étalon primaire qui dominent le bilan d'incertitude.

Tableau 9: Bilan d'incertitudes sur les mesures de CM sous les lignes (protocole UTE C99-132, voir p.33)

50 Hz champ H (range 100 µT) (plage de température 10°C / 35°C)					
	Valeurs Maximales ± (dB) [*]	Distribution	Coefficient de sensibilité	Coefficient de réduction	Incertitude- type 1σ ± (dB)
Raccordement	0,15	K=2	1	2	0,08
Température	0,77	rectangulaire	1	1,73	0,44
Humidité	0,05	rectangulaire	1	1,73	0,03
Linéarité	0,04	rectangulaire	1	1,73	0,02
Isotropie	0,12	rectangulaire	1	1,73	0,07
Incertitude composée **: $U_c = [(A_1)^2 + (B_1)^2 + (B_2)^2 + (B_3)^2 + (B_4)^2 + (B_5)^2 + (B_6)^2 + (B_7)^2 + (B_8)^2 + (B_9)^2]^{1/2} =$					0,5
Incertitude élargie ***					0,9
					En % 10,9

* dB = décibel.

** L'incertitude composée combine les incertitudes déterminées par les méthodes de type A (aléatoire) et de type B (systématique). Seules les composantes de type B, B1 à B5, sont données dans le tableau.

*** L'incertitude élargie est l'incertitude composée par le facteur d'élargissement k=2 (95%).

Tableau 10: Bilan d'incertitudes sur les mesures de CE sous les lignes (protocole UTE C99-132, voir p.33)

50 Hz champ E (range 1 kV) (plage de température 10°C / 35°C)						
	Valeurs Maximales ± (dB*)	Distribution	Coefficient de sensibilité	Coefficient de réduction	Incertitude- type 1σ ± (dB)	
Raccordement	0,79	K=2	1	2	0,40	
Température	0,77	rectangulaire	1	1,73	0,44	
Humidité	0,05	rectangulaire	1	1,73	0,03	
Linéarité	0,34	rectangulaire	1	1,73	0,19	
Isotropie	0,54	rectangulaire	1	1,73	0,31	
Incertitude composée** : $U_c = [(A_1)^2 + (B_1)^2 + (B_2)^2 + (B_3)^2 + (B_4)^2 + (B_5)^2 + (B_6)^2 + (B_7)^2 + (B_8)^2 + (B_9)^2]^{1/2} =$					0,7	En % 17,1
Incertitude élargie***					1,4	

* dB = décibel

** L'incertitude composée combine les incertitudes déterminées par les méthodes de type A (aléatoire) et de type B (systématique). Seules les composantes de type B, B1 à B5, sont données dans le tableau.

*** L'incertitude élargie est l'incertitude composée par le facteur d'élargissement k=2 (95%).

Tableau 11 : Bilan d'incertitudes sur les mesures de CM à proximité des machines agricoles

Domaine de 50 Hz à 500 Hz champ H (range 100 µT) (plage de température 10°C / 35°C)						
	Valeurs Maximales ± (dB*)	Distribution	Coefficient de sensibilité	Coefficient de réduction	Incertitude- type 1σ ± (dB)	
Raccordement	0,15	k=2	1	2	0,08	
Température	0,77	rectangulaire	1	1,73	0,44	
Humidité	0,05	rectangulaire	1	1,73	0,03	
Linéarité	0,04	rectangulaire	1	1,73	0,02	
Isotropie	0,12	rectangulaire	1	1,73	0,07	
Incertitude composée** : $U_c = [(A_1)^2 + (B_1)^2 + (B_2)^2 + (B_3)^2 + (B_4)^2 + (B_5)^2 + (B_6)^2 + (B_7)^2 + (B_8)^2 + (B_9)^2]^{1/2} =$					0,5	En % 18,3
Incertitude élargie*** + réponse en fréquence non corrigée					1,5	

* dB = décibel

** L'incertitude composée combine les incertitudes déterminées par les méthodes de type A (aléatoire) et de type B (systématique). Seules les composantes de type B, B1 à B5, sont données dans le tableau.

*** L'incertitude élargie est l'incertitude composée par le facteur d'élargissement k=2 (95%).

Annexe 5 : Tableaux de synthèse

Tableau 12 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur le comportement des animaux de rente

Espèce Animale	Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition (amplitude, fréquence)	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets	Référence
Vache laitière	4 par groupe	0 et 4 mA	Sous cutané au niveau de l'épine dorsale; lombaire	Pendant 30 sec toute les min, durant 5 min	Toutes les 4 h pendant 4 jours consécutifs	Pas d'effet sur la MSI, l'ingestion d'eau,	(Gorewit <i>et al.</i> 1985)
	30 par groupe (15 primipares et 15 multipares)	0 ; 0,5 ; 1, 2 et 4 V	Mufle- sabots		Durant 21 jours et après	Pas d'effet sur la MSI et la quantité d'eau bue	(Gorewit <i>et al.</i> 1989)
	74	1,8 V; 3,6 mA	Abreuvoir	Permanent Aléatoire (36 h/semaine)	8 semaines	Activité motrice augmentée	(Rigalma <i>et al.</i> 2010)
	32	0 et 1 mA (60 Hz) présence/absence phase de massage	Sabots avant – sabots arrière	Pendant la traite	sur une seule traite	Activité motrice courant ; NS défaut phase ; <	(Reinmann <i>et al.</i> 2002)
	16	0 et 1 mA (60 Hz) manchons trop âgés ou non	Sabots avant – sabots arrière	Pendant la traite	sur une seule traite	Activité motrice courant ; NS manchon utilisé ; <	
	8 vaches	0,25 ; 0,5 puis tous les 0,5 mA jusqu'à 4 mA (60 Hz)	Museau-sabots ; sabot avant-sabots arrières	Pendant 1 min	toutes les 2 min	comportement de sursaut ; patte avant-patte arrière < museau-pattes	(Reinmann <i>et al.</i> 2003)
	4 vaches	0,5 ; 0,75 ; 1,0 ; 1,5 fois le seuil de réaction R (60 Hz)	Museau-sabots ; sabot avant-sabots arrières	Pendant 5 min	toutes les 10 min	activité motrice > au niveau 1,0 fois le seuil de réaction R.	

Espèce Animale	Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition (amplitude, fréquence)	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets	Référence
Vache laitière	24	4 groupes : - contrôle (0 mA) - R (mA) : seuil de réponse comportementale (sursaut) - R + 1,5 mA - R + 3 mA	Mufle-sabots	Toutes les secondes, à l'abreuvement, durant 24 h	Pendant 21 j	Pas d'effet sur 21 j sur consommation aliment et eau si courant autour de R (4,9 à 9,5 mA RMS), R + 1,5 ou R + 3 mA ; effet sur 1 ^{ier} jour d'exposition à R + 3 mA : consommation aliment et eau <	(Reinemann <i>et al.</i> 2005)
	8	2 groupes Contrôle : 0 mA R x 1,5 mA	Mufle-sabots	Toutes les secondes, à l'abreuvement, durant 24 h	Pendant 21 j	effet sur 1 ^{ier} et 2 ^{sd} jour d'exposition à R * 1,5 mA : consommation aliment et eau <	
Porc en croissance	72	0 - 2 et 5 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	8-21 sem d'âge Animaux restreints ou à volonté	Chez animaux restreints : - activité à la mangeoire et abreuvoir < à 5 V - durée épisodes abreuvement, temps passé à boire < à 5 V	(Robert <i>et al.</i> 1991)
	72	0 – 5 et 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	10 - 22 sem d'âge Animaux restreints ou à volonté	Durée et nombre de séquences d'abreuvement après distribution alimentaire < à 8 V Consommation d'eau < à 5 et 8 V entre 14 -16 sem Fréquence activité diurne à l'auge : > à 8 V chez animaux restreints NS chez animaux à volonté 8 V : repos diurne <	(Robert <i>et al.</i> 1992a)
	72	0 ; 0 à 2 ; 2 à 5 ; et 5 à 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	9 - 21 sem d'âge	Comportement alimentaire, boisson, coucher : NS 9-10 sem : fouille > 5-8 V exclusion congénère de l'auge > 2-5 V	(Godcharles <i>et al.</i> 1993)

Espèce Animale	Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition (amplitude, fréquence)	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets	Référence
Truie	120	0 ; 2 à 5 ; 5 à 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	Gestation-lactation	Gestante : coucher > ; stéréotypies < à 2-5 et 5-8 V Truie allaitante et porcelet : NS Consommation eau, aliment NS excepté sem 1 ^{ère} lactation > à 2-5 et 5-8 V	(Robert et al. 1996)

*0.5 V = 0,6 à 1,3 mA; 1 V = 1,2 à 4 mA; 2 V = 4,7 à 7,9 mA; 4 V = 5,5 à 12,1 mA.

MSI : matière sèche ingérée; NS = non significatif ; RMS : root mean square (valeur efficace)

R = seuil de réponse comportementale (sursaut) ; < = inférieur

Tableau 13 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur le comportement d'animaux de rente, en conditions terrain ou semi-contrôlées

Catégorie	Effectif	CE (kV/m)	CM (μ T) (fréquence Hz)	Conditions d'exposition	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Bovin viande	ND	12	ND	ND	Pas d'effet sur le comportement au pâturage et la consommation	(Busby <i>et al.</i> 1974)
Vache allaitante	574	5,6	ND	Sous ligne HT Témoins à 550 m des traités	Pas d'effet sur la consommation alimentaire	(Raleigh 1988) (Angell <i>et al.</i> 1990)
Femelle et veau	200 paires	ND	ND	Bâtiment sous ligne THT 500 kV témoin : éloigné de 550 m exposition pendant 29 mois, 3 cycles, 2 vélages	Pas d'effet sur l'activité comportementale des animaux dans les loges d'élevage	(Ganskopp <i>et al.</i> 1991)
Bovin domestique / cerf	ND	ND	(50-60 Hz)	Pâturage 0-150 m ligne HT	Suppression de l'alignement spontané des corps en activité de pâture et de repos, dans la direction nord-sud du champ magnétique terrestre	(Begall <i>et al.</i> 2008)
Agnelle	30	6,25	3,77	1 ligne de 500 kV et 2 lignes de 230 kV 300 j	Pas d'effet sur le comportement au pâturage	(Stormshak <i>et al.</i> 1993)
Poisson	ND	ND	(50 Hz)	Rivière sous ligne THT 110-220 kV	Pas d'effet sur le comportement d'orientation chez les cyprinidés, perchidés, clariidés. Modification du comportement d'orientation (évitement CE) et recherche alimentaire chez esturgeon et poisson-chat	(Basov 2007)

ND : Non disponible

Tableau 14: Effets des champs électromagnétiques sur le comportement en conditions contrôlées

Animaux		Resultats							
Espèce	N	Stade	CE (kV/m)	CM (µT)	Modalités durée	Période	Mesures / Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Exposition à des champs électromagnétiques > 200 µT									
Souris	20	Femelle gestante / adulte	-	5 000 (50 Hz)	-	Gestation	Apprentissage spatial labyrinthe radial descendance à l'âge adulte testée	Pas d'effet sur les performances d'apprentissage	(Sienkiewicz <i>et al.</i> 1996b)
	20	Mâle adulte	-	5 50 500 5 000	-	Pendant le test	Apprentissage alimentaire 10 sessions	Pas d'effet sur les performances d'apprentissage	(Sienkiewicz <i>et al.</i> 1996a)
	12	Mâle adulte	-	750 (50 Hz)	45 min	Avant test apprentissage	Apprentissage spatial : labyrinthe radial 10 sessions	Déficit d'acquisition d'évitement du choc électrique, mais limité aux premières sessions d'apprentissage	(Sienkiewicz <i>et al.</i> 1998b)
	2	Mâle Femelle	-	8 000 (50 Hz)	60 min	Avant chaque session apprentissage	Apprentissage évitement passif choc électrique	Déficit d'acquisition de l'évitement du choc électrique en phase de test	(Foroozandeh <i>et al.</i> 2011)
	60	Mâle Femelle	-	8 000 (50 Hz)	4 h	après session apprentissage	Apprentissage évitement passif choc électrique	consolidation réduite de la mémoire testée 24 h après l'apprentissage	(Foroozandeh <i>et al.</i> 2013)
	20	Mâle 4 semaines d'âge	-	3 000 (60 Hz)	8 h /jour	25 jours	Tests : <i>open-field</i> Labyrinthe élevé en croix Emergence (lumière/obscurité) Nage forcée	Pas d'effet sur comportement dans tests <i>open-field</i> et labyrinthe Test émergence : latence entrée dans boîte éclairée > chez animaux exposés Test nage forcée : distance parcourue <, immobilité > chez animaux exposés	(Kitaoka <i>et al.</i> 2013a)
Rat	24	Male Spague-Dawley adulte	-	1 000 (60 Hz)	60 min	Immédiatement avant session apprentissage	Apprentissage spatial Piscine de Morris plateforme submergée 6 sessions de test	Pas d'effet sur performance d'apprentissage pour trouver la plateforme, mais vitesse de nage réduite déficit de la mémoire spatiale quand plateforme retirée une heure après la dernière session	(Lai et Carino 1999)
	163	Mâle	-	1 000 (60 Hz)	2 h	Pendant 9 jours	Test de reconnaissance sociale testé à 30, 150, 300 min et 24 h	Mémoire court terme augmentée Pas d'effet sur mémorisation à 24 h	(Vazquez-Garcia <i>et al.</i> 2004)

Animaux			Resultats						
Espèce	N	Stade	CE (kV/m)	CM (µT)	Modalités durée	Période	Mesures / Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Rat	33	Mâle adulte Wistar	-	(50 Hz) 2 000, 8 000	20 min	juste après apprentissage	Apprentissage spatial Piscine de Morris, détection plateforme submergée	Consolidation de la mémoire réduite avec exposition à 8 000 µT, 48 h après apprentissage	(Jadidi <i>et al.</i> 2007)
	20		-	8 000	20 min	juste avant test de mémorisation	Apprentissage Piscine de Morris spatial	Pas d'effet sur performance de mémorisation	
	14		-	8 000	20 min	juste après apprentissage	Apprentissage Piscine de Morris plateforme visible	Pas d'effet sur performance de mémorisation	
	96	Femelle gestante	-	83,3 500	21 h/j	J6 gestation à J21 lactation	Apprentissage, tests anxiogènes : réponses de la progéniture	Pas d'effet sur réflexe pupillaire, test de traction réponse géotaxique, test de rebond acoustique, test piscine de Morris	(Chung <i>et al.</i> 2004)
	91	Progéniture	-	(60 Hz)					
	44	Adulte Wistar	-	500	24 h/j	7 jours	Activité motrice et stéréotypée pendant 2 h dans test <i>open-field</i> : Jour 1, 3 et 7	Augmentation de l'activité locomotrice uniquement jour 1 Atténuation de l'activité motrice induite par injection d'amphétamine après 7 j d'exposition Atténuation de l'activité stéréotypée induite par injection d'amphétamine indépendamment de la durée d'exposition	(Janač <i>et al.</i> 2005)
	163	Male adulte	-	1 000	2 h/j	9 jours	Test de reconnaissance sociale, intervalle testé : 30, 150, 300 min, 24 h	Effet positif : mémoire à court terme accrue jusqu'à 300 min Pas d'effet sur la locomotion dans la cage de test	(Reyes-Guerrero <i>et al.</i> 2006)
	30	Adulte	-	2 000	1 h 2 fois/j 4 h 2 fois/j	25 jours	Tests anxiogènes : <i>open-field</i> Labyrinthe surélevé Test émergence (lumière /obscurité)	Exposition 4 h : augmentation des réponses d'anxiété dans test <i>open-field</i> et labyrinthe surélevé Pas d'effet sur réponses au test lumière/obscurité	(Liu <i>et al.</i> 2008)

Animaux						Resultats			
Espèce	N	Stade	CE (kV/m)	CM (µT)	Modalités durée	Période	Mesures / Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Rat	80	Mâle adulte	-	500 (50 Hz)	20 min	Juste avant tests	Tests anxiogènes * Labyrinthe élevé * Objet nouveau Challenges sociaux * interactions * territorialité	Anxiété situationnelle accrue passivité accrue (locomotion, immobilité accrue) passivité accrue, désintérêt vis-à-vis objet pas d'effet sur anxiété sociale	(Balassa <i>et al.</i> 2009)
	90	Mâle Wistar	-	5 000 (50 Hz)	1, 4, 6, et 8 h 4 h	après apprentissage pendant 3, 4, 5, 8 j puis 24 h après dernière session	Apprentissage boîte évitement passif lumière/obscurité	Consolidation mémoire (CT) réduite après 4, 6, 8 h exposition pas d'effet sur mémorisation (LT)	(Babri <i>et al.</i> 2010)
	32	Mâle adulte Sprague-Dawley	-	500 (50 Hz)	8 h/jour 24 h	5 jours (CT) 4 - 6 semaines (LT)	Exposition CT et LT : Test labyrinthe en croix surélevé Test Exposition LT : nage forcée	Pas d'effet sur le comportement dans le test de labyrinthe avec exposition CT ou LT test nage forcée : temps de flottaison (immobilité) > chez animaux exposés : réponse dépressive	(Szemerszky <i>et al.</i> 2010)
Oiseau	32	Poussin 7 jours	-	1 000	20 h/j 50 min/j	Pendant 7 jours	Test de détour	Performances apprentissage réduites avec exposition 20 h/j	(Che <i>et al.</i> 2007)
Exposition à des champs électromagnétiques ≤ 200 µT									
Souris	66	Mâle C57BL/6J 12 sem	-	7,5 – 75	45 min 45 min/j	juste avant test pendant 4 jours test pendant 5 jours après la dernière exposition	Test labyrinthe radial	Déficit de performance quand exposition > à un seuil entre 7,5 et 75 µT, mais si délai de 45 min entre fin exposition et test pas de déficit observé Pas d'effet sur mémoire LT	(Sienkiewicz <i>et al.</i> 1998a)

Animaux						Resultats			
Espèce	N	Stade	CE (kV/m)	CM (µT)	Modalités durée	Période	Mesures / Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Souris	78	Mâle C57BL/6J		7,5 - 75	45 min	après apprentissage test reconnaissance 3 min après fin exposition	Test reconnaissance objet familier vs nouveau	Pas d'effet sur performance de la tâche de reconnaissance	(Sienkiewicz <i>et al.</i> 2001)
	46	Adulte	-	30 (10 Hz)	aigu	ND	Apprentissage	Extinction plus rapide de la réponse conditionnée à un stimulus acoustique renforcé par un stimulus électrique douloureux	(Gerth <i>et al.</i> 1983)
Rat	20	Mâle adulte Wistar	ND	50 (38Hz)	aigu	ND	Test <i>open-field</i>	Effet limité sur locomotion et exploration, réduite avec cyclotron à calcium, accrue avec cyclotron à magnésium pas d'effet avec autres ions actifs: Na, P, Li, K	(Zhadin <i>et al.</i> 1999)
	67	Mâle adulte Wistar	-	200	24 h	1, 2, 4 sem	Apprentissage Mémoire	Moindre discrimination entre objets familier et inconnu quand exposition sur 2 semaines	(Mostafa <i>et al.</i> 2002)
	41	Fœtus Raton	30	100	20 h/j	22 j <i>in utero</i> 8 j postpartum	Apprentissage chez mâle adulte	Réponse opérante à un conditionnement alimentaire réduite avec effets maintenus après extinction et nouveau test de conditionnement	(Salzinger <i>et al.</i> 1990)
	ND	Male adulte Wistar	-	0,2 0,5	60 min	* Immédiatement après apprentissage * immédiatement avant test mémorisation	Apprentissage Labyrinthe radial	Mémoire spatiale réduite Motivation de la locomotion dans le labyrinthe	(McKay et Persinger 2000)
	96 91	Femelle gestante Ratons	-	5 - 83,3 (60 Hz)	21 h/j	6 j gestation à 21 j de lactation	Apprentissage, tests anxiogènes, réflexe : réponses de la progéniture	Pas d'effet sur la réponse des jeunes à des tests de comportement : réflexe de redressement, géotaxie négative, test de traction, réflexe pupillaire test <i>open-field</i> , test piscine	(Chung <i>et al.</i> 2004)

Animaux						Resultats				
Espèce	N	Stade	CE (kV/m)	CM (µT)	Modalités durée	Période	Mesures / Test		Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Oiseau	20 paires	Faucon crécerelle captif	10	30	21 h/j	95 jours	Comportement parental	reproducteur et	Augmentation des comportements de cour et de vigilance chez les mâles pendant l'incubation, Moindre activité de toilettage et de repos pendant la phase de couvaison chez la femelle	(Fernie <i>et al.</i> 2000a)

CT : court terme, LT : long terme ; ND : Non disponible

Tableau 15 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur la production laitière (PL) et certains autres paramètres zootechniques mesurés chez la vache laitière.

Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets sur la PL	Autres paramètres évalués	Référence
6 (5 pour le courant intermittent) en début ou milieu de lactation	5 mA (60 Hz)	Électrodes posées sur zone rasée au-dessus du jarret arrière et au-dessus du genou avant	Continu et intermittent	Sur une seule traite, 10 min avant. Continu : pendant 20 min Intermittent: pendant 5 s toutes les 30 s.	continu: pas d'effet intermittent : effet significatif : diminution ($p < 0,1$)		(Lefcourt et Akers 1982)
4 multipares et gestantes par groupe	0 et 4 mA	Sous cutané au niveau de l'épine dorsale; région lombaire	Pendant 30 sec toute les min, durant 5 min	Toutes les 4 h pendant 4 jours consécutifs	Pas d'effet	Pas d'effet sur la MSI, l'ingestion d'eau, le taux de cellules du lait, la composition du lait	(Gorewit <i>et al.</i> 1985)
6 multipares par groupe	0 ; 4 et 8 mA (60 Hz)	Mamelle - sabots	Pendant 5 s toutes les 30 s	Avant et pendant la traite, durant 7 jours	Pas d'effet		(Henke Drenkard <i>et al.</i> 1985)
13 dont 7 primipares et 6 multipares	3,6 mA et 6 mA (60 Hz)	membres antérieurs – membres postérieurs	Pendant 5 s toutes les 30 s	7 jours (traite du matin et du soir)	Pas d'effet		(Lefcourt <i>et al.</i> 1985)
7 dont 1 primipare et dont 2 gestantes	0 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 et 12,5 mA (60 Hz)	Électrodes posées sur zone rasée au-dessus du jarret arrière et au-dessus du genou avant	Pendant 10 s	1 h avant traite du matin, 2 fois/semaine	Pas d'effet		(Lefcourt <i>et al.</i> 1986)
6 multipares en fin de lactation	4 mA (60 Hz)	Région lombaire sacro-	10 s avant puis en continu pendant la traite	6 jours, à la traite du matin	Pas d'effet		(Gorewit et Scott 1986)

Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets sur la PL	Autres paramètres évalués	Référence
30 par groupe (15 primipares et 15 multipares)	0 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 V*	Mufle - sabots		Durant 21 jours et après	Pas d'effet	Pas d'effet sur la MSI et la quantité d'eau bue	(Gorewit <i>et al.</i> 1989)
15 dont 7 primipares et 8 multipares	5; 8 et 16 mA (60 Hz)	Extrémité des trayons - sabots arrières	Pendant la traite	6 traites consécutives	Pas d'effet		(Aneshansley <i>et al.</i> 1992)
40 multipares (10 par groupe) (RL = 2 à 5)	0 ; 1 ; 2 et 4 V	Mufle - sabots avant		Lactation entière	Pas d'effet	Pas d'effet sur le TP et le TB Pas de problème de pied Pas d'effet sur le poids vif et le taux de mammites	(Gorewit <i>et al.</i> 1992a; Gorewit <i>et al.</i> 1992b)
8 primipares et multipares par groupe	0 et 1 mA (60 Hz) x présence/absence phase de massage	Sabots avant – sabots arrière		Pendant la traite, sur une seule traite	Pas d'effet		
4 vaches par groupe	0 et 1 mA (60 Hz) x manchons trop âgés ou non	Sabots avant – sabots arrière		Pendant la traite, sur une seule traite	Courant NS ; Défaut phase NS ; interaction S		(Reinemann <i>et al.</i> 2002)
24 vaches par groupe	0 et 1 mA (60 Hz)	Sabots avant – sabots arrière		Pendant la traite, sur une seule traite	NS		

Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets sur la PL	Autres paramètres évalués	Référence
4 vaches par groupe	4 groupes : 0, R, R + 1,5 mA, R + 3 mA 2 groupes : 0, R x 1,5 mA	Mufle-sabots	Toutes secondes, l'abreuvement, durant 24 h	les 21 jours consécutifs à si courant autour de R (4,9 à 9,5 mA RMS)	NS pour tous les groupes sur 21 j ; S sur 1 ^{ère} semaine si courant R+3 ou R x 1,5 (6,2 à 11 mA RMS)	Pas d'effet sur 21 j sur MSI et eau ingérée si courant autour de R (4,9 à 9,5 mA RMS) ou R+1,5 ou R+3 ; effet sur MSI et eau ingérée dans la 1 ^{ère} semaine pour R+3 et R+1,5 ; effets récupérés en semaines 2 et 3	(Reinemann <i>et al.</i> 2005)
74	1,8 V; 3,6 mA	Abreuvoir	Permanent aléatoire (36 h/semaine)	8 semaines	NS NS	Pas d'effet sur la composition du lait, la quantité d'eau bue	(Rigalma <i>et al.</i> 2010)

*0.5V = 0,6 à 1,3 mA; 1V = 1,2 à 4 mA; 2V = 4,7 à 7,9 mA; 4V = 5,5 à 12,1 mA.

PL = production laitière; RL = rang de lactation; TP = taux protéique; TB = taux butyreux; NS = non significatif ; R = niveau de courant (mA) créant une réponse comportementale ; MSI = matière sèche ingérée ; RMS : root mean square (valeur efficace).

Tableau 16 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions semi-contrôlées.

Caractéristiques des animaux				Traitement			Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Catégorie	Effectif	Jours de lactation	Jours de gestation	CE (kV/m)	CM (µT)	Durée (j)		
Bovin viande	ND	-	-	12	ND	ND	Pas d'effet sur la consommation alimentaire	(Busby <i>et al.</i> 1974)
Vache allaitante	574	Témoins à 550 m des traités		5,6	ND	ND	Pas d'effet sur la consommation alimentaire, la santé, le taux de mortalité, le sevrage, le taux de vêlage, le développement sexuel des veaux et le poids des carcasses	(Raleigh 1988) (Angell <i>et al.</i> 1990)
Brebis	20	Témoins à 229 m des traités		6	3,37	240	Pas d'effet le GMQ	(Thompson <i>et al.</i> 1995)
	20	Témoins à 220 m des traités		6	3,37	300	Pas d'effet sur le taux de progestérone, l'âge à la puberté et le nombre de cycles oestriens successifs	(Lee <i>et al.</i> 1993)
Génisse	58	-	-	4	2	120	Pas d'effet sur le cycle oestrien et sur le taux de progestérone	(Algers and Hultgren 1987)
Agnelle	30	-	-	6,25	3,77	300	Pas d'effet sur la croissance de la laine, l'âge de la puberté Réduction apparente de l'activité du système immunitaire	(Stormshak <i>et al.</i> 1993)
	30			6,81	3,5	300	Pas de modification de l'activité des IL-2, de l'expression des récepteurs à IL-1, IL-2 et TNF- α ↑de la prolifération lymphocytaire et de TNF- α	Hefeneider <i>et al.</i> 1994
	45			6,81	3,5	810	Pas de modification des IL-1 et IL-2	Hefeneider <i>et al.</i> 2001

ND = non disponible ; GMQ = gain moyen quotidien.

Tableau 17 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions contrôlées.

Caractéristiques des animaux				Traitement			Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Catégorie	Effectif	Jours de lactation	Jours de gestation	CE (kV/m)	CM (µT)	Durée (j)		
Vache laitière	16	185	102	10	30	28	↑MSI (+5,5%), TB (+9%), PL (+9%)	(Burchard <i>et al.</i> 1996)
	16	170	91	10	30	28 (16 h/j)	Pas d'effet sur la PL et la composition du lait sauf ↓ TB (- 0,25 pts) ↑MSI (+6%)	(Rodriguez <i>et al.</i> 2002)
	16	150	Non gestante	10	30	24-27 (cycle oestral)	↓ PL (-5%) et TB (-16%); ↑MSI (+5%)	(Burchard <i>et al.</i> 2003)
Génisse	16 ovariectomisée	ND	100	10 (60 Hz)	non	28 en continu	Pas d'effet sur la MSI	(Burchard <i>et al.</i> 2004)
	32	ND	210	non	30	28	↑ poids vif (+1,2%) et GMQ (+30%)	(Burchard <i>et al.</i> 2007)

MSI = Matière sèche ingérée ; PL = production laitière ; TB = Taux butyreux ; GMQ = gain moyen quotidien.

Tableau 18 : Effets majeurs de l'exposition à un champ électromagnétique (CEM) sur le développement embryonnaire de l'oiseau

Espèce Animale	Effectif total	Souche	Stade d'exposition	Nature De l'exposition CEM	Caractéristiques de l'exposition	Modalités d'exposition	Effets	Référence
Poule	68	Leghorn	Début d'incubation	continu	0,12 ; 1,2 ; 12 μ T (10, 100, 1 000 Hz)	48 h en continu	Combinaison 100 Hz/1,2 μ T la plus inhibitrice du développement embryonnaire ; « effet fenêtre »	(Delgado <i>et al.</i> 1982)
	659	Leghorn	Début d'incubation	pulsé	0,4 à 104 μ T (100 Hz)	48 h pulsé durée 500 μ s Pulse A* de 100 μ s ou pulse B de 2 μ s ou pulse C de 42 μ s	Intensités de 1 et 13,9 μ T avec pulse de 100 μ s le plus tératogène « Effet fenêtre »	(Ubeda <i>et al.</i> 1983)
	276	Leghorn	Début d'incubation	pulsé	1 μ T (100 Hz)	48 h pulsé durée 500 μ s Pulse A* de 85 μ s et Pulse B de 2,1 μ s	Forte anomalies du développement et Forte mortalité avec le pulse B mais pas avec le pulse A	(Ubeda <i>et al.</i> 1994)
	24	-	Embryon de 4 jours	pulsé	2,1 mT (15 Hz)	100 h durée 5 ms Répété toutes les 67 ms	Pas d'effet sur le développement embryonnaire	(Coulton et Barker 1991)
	307	Leghorn	avant l'incubation	continu	de 1,33 à 7,32 mT (50 Hz)	24 h en continu	Plus d'embryons anormaux avec intensités de 4,9 à 6,65 mT « Effet fenêtre »	(Lahijani et Sajadi 2004)
Poulet	180	Gallus	Début d'incubation	continu	(15 à 18 Hz)	Exposition à écran de télévision ou d'ordinateur pendant 21 jours	Forte mortalité embryonnaire (47 à 68 %) ; chute des taux plasmatiques d'IgG, de corticostérone et de mélatonine	(Youbicier-Simo <i>et al.</i> 1997)
	636	Gallus	Début d'incubation	pulsé	10 μ T (50 ou 100 Hz)		Altération du développement des somites dès 45 h d'exposition Désordres plus graves après 21 jours d'exposition ; pas d'effet tératogène	(Roda <i>et al.</i> 2011)

Espèce Animale	Effectif total	Souche	Stade d'exposition	Nature De l'exposition CEM	Caractéristiques de l'exposition	Modalités d'exposition	Effets	Référence
Poulet	360	Ross	Avant incubation	continu abreuvoir-plancher métallique	1,8 mT (50 Hz)	Exposition 0, 15, 30, 45, 60 et 75 minutes	Pas d'effet sur éclosabilité et poids du poussin à l'éclosion Pas d'effet sur l'indice de consommation Les poussins exposés 60 et 75 minutes ont un GMQ et un ingéré inférieurs à 39 jours d'âge	(Shafey <i>et al.</i> 2011)
	750	Ross	Début d'incubation	continu	0,5 mT (50 Hz)	2 h/jour De 0 à 7 jours De 8 à 14 jours De 15 à 21 jours De 1 à 21 jours	L'exposition durant le 1 ^{er} tiers ou le second tiers de la vie embryonnaire cause une forte mortalité et un taux d'éclosion réduit	(Lotfi et Narimani-Rad 2012)
	750	Ross	Début D'incubation	continu	0,5 mT (50 Hz)	2h/jour De 0 à 7 jours De 8 à 14 jours De 15 à 21 jours De 1 à 21 jours	Pas d'effet sur les taux plasmatique de cholestérol total, de fer et d'acide urique Seul le taux de glucose diminue pour l'exposition durant la 3 ^{ème} semaine d'incubation ou toute la durée de l'incubation	(Lotfi et Narimani-Rad 2012)
Caille	400	Caille domestique	Début d'incubation	bipolaire	0,2 à 3,3 µT (50 ou 100 Hz)	21 jours Signal bipolaire continu	Plus d'embryons anormaux avec la combinaison 100 Hz/1 ,2 µT Pas de différence par rapport au contrôle avec 50 Hz	(Terol et Panchon 1995)

* : pulse A, pulse B et pulse C : les temps indiqués sont les temps de montée et de descente de l'onde.

Tableau 19: Effets majeurs de l'exposition à un champ électromagnétique (CEM) sur la reproduction des oiseaux

Souche/espèce	Effectif	Stade d'exposition	Nature d'exposition CEM	Caractéristiques de l'exposition	Modalités d'exposition	Effets	Références
Reproductrices souche pondreuse	30	Début de ponte	CEM	1 600 V/m (60 Hz)	12 semaines + 4 semaines de non exposition	Amélioration de la fertilité Taux d'éclosion non affecté Moins de poussins mâles (32,3%) Pas de modification de la mortalité embryonnaire ; Pas d'anormalité des poussins Baisse du nombre d'oeufs pendant les 11 premières semaines	(Krueger <i>et al.</i> 1975)
Buses	29	Nidification	CEM	-	Nidification sur pylone de ligne THT de 230 kV	Mêmes performances de reproduction chez les buses exposées au CEM et les buses non exposées	(Gilmer et Wiehe 1977)
Corbeaux, Aigle royal et buse à queue rousse, Buse rouilleuse	266	Nidification	CEM	-	Nidification le long d'une ligne à haute tension de 500 kV	Mêmes performances de reproduction chez les corbeaux, aigles et buses à queue rousse exposées au CEM et les oiseaux non exposées ; les performances sont même supérieure chez la Buse rouilleuse exposée à un CEM.	(Steenhof <i>et al.</i> 1993)
Hirondelle et troglodyte	27 40	Nidification	CEM	-	Nidification le long d'une ligne HT de 765 et 69 kV	Mêmes performances de reproduction chez le troglodyte exposé ou non Moins bonnes performances de reproduction (plus faible couvée) chez l'hirondelle exposée comparée à l'hirondelle non exposées	(Doherty Jr et Grubb Jr 1998)
Faucon crécerelle	86	Nidification	CEM	30 µT 10 kV/m (60 Hz)	Exposition expérimentale mimant le nichage sous ligne de 735 kV d'une durée de 21 et 23,5 jours	Pas d'effet sur la taille de la couvée Meilleure fertilité et augmentation de la taille des œufs chez les oiseaux soumis au CEM	(Fernie <i>et al.</i> 2000b)
Passereaux	ND	Nidification	CEM	(50 Hz)	Nidification le long d'une ligne HT de 110 kV	Taille des œufs similaire chez la citelle torche pot et la mésange noire exposés, inférieure chez la mésange charbonnière exposée et supérieure chez la mésange bleue. La taille de la couvée est inférieure chez la mésange charbonnière	(Hamann <i>et al.</i> 1998)
Mésange charbonnière	163	Nidification	CEM	0,0 à 8,4 mG	Nidification le long d'une ligne HT de 66 kV	Les œufs des mésanges exposées sont de taille supérieure; la taille de la couvée est également supérieure chez les oiseaux exposés	(Tomás <i>et al.</i> 2012)

Tableau 20 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites ou un CEM-EBF sur les performances et autres paramètres zootechniques ou de santé mesurés chez le porc

Effectif d'animaux	Caractéristiques de l'exposition	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets sur les performances	Autres paramètres évalués	Référence
72 porcs croissance	en 0 ; 2 ; 5 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	permanent 24 h/jour	8-21 sem d'age	CMJ < et GMQ < entre 17 et 21 sem : à 5V Conversion Alimentaire, NS	NS : Index carcasse, lésions gastriques, paramètres hématologiques et biochimiques	(Robert et al. 1991)
72 porcs croissance	en 0 ; 5 ; 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	10-22 sem d'age	GMQ, CMJ : NS		(Robert <i>et al.</i> 1992a)
72 porcs croissance	en 0 ; 0 à 2 ; 2 à 5 ; 5 à 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	9-21 sem d'âge	GMQ, CMJ : NS:		(Godcharles <i>et al.</i> 1993)
120 truies	0 ; 2 à 5 ; 5 à 8 V	Mangeoire, abreuvoir-plancher métallique	Permanent 24 h/jour	Gestation lactation	Consommation eau : NS ; aliment < sem 1 lactation: Fecondité, prolificité, % nés vivants et croissance porcelets: NS 2-5 V : mortalité porcelets >	Paramètres métaboliques : NS contrôle : Diarrhée >	(Robert <i>et al.</i> 1992b)

GMQ = gain de poids quotidien ; CMJ = consommation moyenne d'aliment par jour
NS = non significatif ;

Tableau 21 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur les rythmes et le taux de mélatonine [d'après (Touitou et Selmaoui 2012)]

Caractéristiques des animaux				Traitement			Paramètres évalués	Effets mesurés (cf revue critique (Touitou et Selmaoui 2012))	Référence
Esp	Effectif	Stade	gestation	CE (kV/m)	CM (µT)	Durée (j)			
Vache laitière	16 Multi- pares	185 j lactation	102 j	10 (60 Hz)	30	28	MEL, PRL Prélèvements chaque 30 min sur 14 h à partir de 17 h	Pas d'effet sur le taux de mélatonine	(Burchard <i>et al.</i> 1998)
	32	16 en lactation 170 j	16 gestantes 91 j	10 vertical	30 horiz ontal	28 16 h/j (J/N 8 h/16 h)	MEL, PRL-P4, mesures J & N	Pas d'effet de nuit Jour : mélatonine basse Globalement pas d'effet	(Rodriguez <i>et al.</i> 2004)
	16	22 mois	100 j	10 (60 Hz)	30	20 h/j - 28j (12/12h J/N)	Comparaison avec/sans CM. MEL, PRL-P4 ; Progestérone-PRL, IGF1 1 seule mesure de Jour	Absence de variation répétable des paramètres physiologiques. Incertitudes sur répétabilité mesures MEL absence de suivi des variations [MEL] _{sang} Jour/Nuit	(Burchard <i>et al.</i> 2004)
	32	20 mois	3 mois	(60 Hz)	30	20 h/j - 28j (12/12h J/N)	Comparaison avec/sans CM: MEL, Prolactine-P4, Progestérone-PRL, facteur de croissance « <i>Insuline-like -IGF1</i> 1 seule mesure de jour	- 15% PRL ; - 4% IGF1, Pas d'effet sur le T de mélatonine Aucun signe clinique	(Burchard <i>et al.</i> 2007)
Ovin	20	agnelle agneaux	-	6	0,04	2-10 mois d'age		Pas d'effet sur le rythme circadien de la mélatonine	(Lee Jr <i>et al.</i> 1993)
	30	agneaux	-	6 (60 Hz)	40	8 mois en continu	MEL	Pas d'effet sur le taux de mélatonine	(Lee Jr <i>et al.</i> 1995)
	30	agnelle	-	6,25	3,77	300		Pas d'effet sur le taux de mélatonine	(Stormshak <i>et al.</i> 1993)

J = jour ; N = nuit ; MEL = mélatonine ; PRL = prolactine

Tableau 22 : Effets de l'exposition à des CEM sur la sécrétion de mélatonine et autres paramètres physiologiques chez des animaux de laboratoire

Espèce	Caractéristiques de l'exposition	Durée	Paramètres évalués	Effets mesurés	Référence
Babouin	1 ; 10 ; 100 μ T (50 Hz)	Continue 6 semaines	SER, MEL Mesure de nuit	Baisse pic nocturne MEL Mais <u>peu significatif</u> -	(Rogers <i>et al.</i> 1995)
Rat adulte	10 ; 65 ; 130 kV/m (50 Hz)	continue	SER (= précurseur de MEL), MEL Mesure de Nuit	Baisse pic nocturne MEL et déphasage retard, <u>mais peu significatif et peu répétable</u> +	(Reiter <i>et al.</i> 1998)
Rat adulte pigmenté & albinos	0,02 à 250 μ T (50 Hz)	continue (42 j)	MEL mesure de nuit	Baisse pic nocturne MEL (pinéale & plasma) si > 1 μ T, mais pas effet dose au-delà 1 μ T +	(Kato <i>et al.</i> 1994a; Kato <i>et al.</i> 1994b; Kato <i>et al.</i> 1994c)
Hamster doré	100 μ T (60 Hz)	18 h/J, 1 mois	MEL mesure nuit & jour	Baisse pic nocturne MEL et déphasage retard +	(Yellon 1994; Yellon et Hilliker 1994)
Faucon crécerelle	10 kV/m 30 μ T (60 Hz)	1 à 2 saisons de reproduction	MEL mesure de jour	Effet seulement sur mâles après expo longue → absence oisillons, Décalage saison reprod +	(Fernie <i>et al.</i> 1999)
Rat âgé	100 μ T (50 Hz)	18 h/J, 1 semaine	SER, MEL NAT pinéale (enzyme conversion-synthèse) Mesure de nuit	baisse nocturne seulement chez jeunes +	(Selmaoui et Touitou 1999)
Rat adulte	1 μ T (50 Hz)	6 semaines continu	MEL pinéale et plasmatique	2 temps : nuit et jour -	(Kato <i>et al.</i> 1993)
Hamster doré	100 μ T (60 Hz)	15 min/jour, 2 h av début nuit	MEL pinéale et plasmatique	Mesure de nuit -	(Yellon 1996)
Hamster de Sibérie	100 μ T (60 Hz)	15 min/jour, 21 j 2 h av début nuit	MEL pinéale et plasmatique	Mesure de nuit -	(Yellon et Truong 1998)

J = jour ; MEL = mélatonine ; PRL = prolactine ; SER = Sérotonine ; NAT = N-acetyl transferase

Tableau 23 : Effets des CEM-EBF sur la fragmentation de l'ADN

Modèle	Caractéristiques de l'exposition	Résultat majeur	Remarque	Référence
Lymphocytes humains + gadolinium	0,8 mT (60 Hz)	Les ondes électromagnétiques augmentent l'effet génotoxique du gadolinium		(Cho <i>et al.</i> 2014)
Souris	1,3 mT, (4 000 Hz) 5 heures	Tendance (NS) à une augmentation du taux de fécondation des œufs		(Hafizi <i>et al.</i> 2014)
Souris C57Bl/6 (4-5 semaines)	1 mT, 3,5 h/j 6 jours (50 Hz),	Augmentation de la vie des neurones de l'hippocampe. Augmentation des niveaux de protéines antiapoptotiques comme Bcl-2 et diminution de l'expression de protéines proapoptotiques comme Bax.		(Podda <i>et al.</i> 2013)
Souris	0,1 ; 0,2 ; 1 ou 2 mT pour 7 jours (15 h/j) (50 Hz)	Seules les souris exposées à 1 ou 2 mT présentent des fragmentations de l'ADN mais retour à la normale 24 h après l'exposition.	Lésions de l'ADN "réversibles" après 24h	(Villarini <i>et al.</i> 2013)
4 lignées cellulaires	1 mT (60 Hz) 4 à 16 h Co-traitement avec radiation et H ₂ O ₂	Par test des comètes : aucun effet des CEM (avec ou sans radiation ou H ₂ O ₂)		(Jin <i>et al.</i> 2014)
Neuroblastome: cellule BE2	1 mT, (50 hz) 48 h exp	Diminution des événements de rétrotransposition		(Del Re <i>et al.</i> 2012)
Fibroblaste murin (3T3)	0,01; 0,5 et 1 mT, 4 h	Pas d'effet des CEM seuls Effets combinés possibles à forte dose > 1mT		(Lee <i>et al.</i> 2012)
Embryons de souris	0.5 mT ; (50 Hz) 4 h/j 6 j/sem; 2 semaines	L'exposition à des CEM-EBF au stade préimplantatoire a des effets négatifs sur la fertilité de la souris et le développement des embryons en diminuant le nombre de blastocystes et en augmentant la fragmentation de l'ADN des blastocystes.	Effet sur la maturation des œufs	(Borhani <i>et al.</i> 2011)
SH-SY5Y (neuroblastome)	100 µT et plus	Pré-exposition à des CEM augmente la réponse de la cellule à la ménadione et augmente la génotoxicité	Augmente génotoxicité	(Luukkonen <i>et al.</i> 2011)

Modèle	Caractéristiques de l'exposition	Résultat majeur	Remarque	Référence
Souris	0,1 ; 0,2 ; 1 or 2 mT (50 Hz) pour 7 jours (15 h/j)	Augmentation des dommages à l'ADN dans toutes les aires cérébrales (test des comètes). Lésions qui disparaissent après 24 h. Le CEM induit l'augmentation de l'expression de hsp70 et un changement de comportement.	Lésions de l'ADN "réversibles" après 24h	(Mariucci <i>et al.</i> 2010)
Fibroblastes en culture primaire et cellules HeLa (cancer col uterin humain)	(0 à 1,5 kHz)	A 1 mT : augmentation des dommages vue par le test des comètes. Explications : due à des modifications dans la phase S et une augmentation de l'apoptose.		(Focke <i>et al.</i> 2010)
87 études de 1990 à 2007 Méta-analyse	variables	Dans 22% des études : anomalies chromosomes et micronoyaux	Méta-analyse	(Vijayalaxmi et Prihoda 2009)
Revue	variables	Les CEM ne sont pas génotoxiques en eux mêmes. Ils augmentent les effets de certains composés génotoxiques. Avec quelques réserves	Revue	(Juutilainen 2008)
Rats Sprague Dawley	0,1 mT (50 Hz), 10 jours	Diminution des capacités antioxydantes chez les rats âgés de 19 mois		(Falone <i>et al.</i> 2008)
Cellules L929 (fibroblastes)	0,1 à 0,3 mT +/- ménadione et/ou +/- UV	La pré-exposition aux CEM augmente la sensibilité des cellules à la ménadione.		(Markkanen <i>et al.</i> 2008)
Neuroblastome (SH-SY5Y)	1 mT (50 Hz) 96 ou 192 h	Diminution de la tolérance aux stress oxydant		(Falone <i>et al.</i> 2007)
Fibroblastes humains	1 mT intermitant (50 Hz) 2-24h	Effets génotoxiques. Anomalies chromosomiques x 10		(Winker <i>et al.</i> 2005)
Myelome humain (HL-60)	0,05 à 1,0 mT 1 à 100 Hz	Augmente prolifération cellulaire et augmente dommage à l'ADN		(Wolf <i>et al.</i> 2005)
Fibroblastes humains (IH-9)	Intermittent 20 à 2 000 µT (50 Hz)	Exposition Intermittente et non en continu : cassure ADN		(Ivancsits <i>et al.</i> 2005)

NS : Non significatif

Tableau 24 : Effets des CEM-EBF sur l'immunité

Modèle	Caractéristiques de l'exposition	Résultat majeur	Remarque	Référence
Culture cellulaire	1 mT (50 Hz) 4 à 6 h	Sur cellules (lignées leucémiques) infectées : réponses immunitaire meilleure, et croissance bactéries pathogènes réduite ⇔ stimulation de l'immunité	effet "favorable" sur l'immunité "in-vitro"	(Akan <i>et al.</i> 2010)
Culture cellulaire	3 mT ou 5 mT (20-5 000 Hz), 30 min	Pas d'effet sur la production de cytokine pro-inflammatoire.	Pas d'effet sur immunité innée "in-vitro"	(de Kleijn <i>et al.</i> 2011)
Culture cellulaire	1 mT (50 Hz), 5 min ou 24 h	Sur macrophages de souris : Sous CEM, hausse de l'activité phagocytaire et de la production d'interleukine (IL-1beta), dès 45 min d'exposition. Avec 24h d'exposition aux CEM: forte hausse de la production d'interleukine. De 0,05 à 1mT : hausse de la formation de radicaux libres ⇔ étape finale de la différenciation des macrophages. Donc stimulation de la réponse "immunitaire" par les CEM sous ce modèle.	Stimulation de l'immunité in-vitro	(Frahm <i>et al.</i> 2006)
Humain	0,2-6,6 µT	Mesures sur 6 hommes (+6 témoins) avec exposition longue (8h/j sur 5 ans, (travail proche de transformateurs et câbles HT) + tests sur 12 rats (seulement). Conclusions "hâtive"des auteurs = un CEM de 0.2-6.6-µT baisse de quelques paramètres immunologiques "globaux" (lymphocytes totaux et CD4 chez home et rats).	Inhibition immunité?	(Bonhomme-Faivre <i>et al.</i> 2003)
Humain	0,21 µT moyenne en	Mesure de lymphocytes T sur 121 hommes exposés à divers CEM dans le cadre professionnel. Exposition moyenne de la cohorte = 0.21 µT (durée longue = profession). Pour les 26 sujets en exposition "haute" (> 0,2µT): tendance (mais NS) à baisse d'activité des lympho T; ET pour les 12 sujets soumis à très haute expo (>1 mT): baisse significative de l'activité des lymphocytes T.	Baisse immuno sous CEM	(Gobba <i>et al.</i> 2009)
Oiseaux	-	Synthèse chez les oiseaux: pas d'effet constant et clair des CEM sur les différentes fonctions physiologiques, dont l'immunité, la reproduction, le comportement, etc	Effet inconstant des CEM	(Fernie et Reynolds 2005)
Rat	0,06 à 0,14 mT pdt 3 ou 6 jours (8 min/j)	La concentration en cytokine proinflammatoire augmente pour les groupes de rats soumis au CEM. Pour l'intensité la plus élevée ET l'exposition la plus longue, baisse du nombre de leucocytes, et de lymphocytes CD45RA+	Effet négatif sur l'immunité	(Beck <i>et al.</i> 2006; Beck <i>et al.</i> 2007)

Modèle	Caractéristiques de l'exposition	Résultat majeur	Remarque	Référence
Cochon d'inde	2 mT; (50 Hz) durée ND	Tests sur le cochon d'Inde (n=19) : sous CEM, réduction de l'activité cytotoxique de lymphocytes T	Effet négatif sur l'immunité	(Canseven <i>et al.</i> 2006)
Souris	70 à 120 µT, durée ND	Sur lignée de souris avec tumeurs, sous CEM moins bonne réponse immunitaire et moins de lymphocytes	Effet négatif sur l'immunité	(Knezević 2005)
Souris	1,5 mT, 8 h/j pdt 10 j	Sur souris, sous CEM: baisse de 25% des gamma globulines.	Effet négatif sur l'immunité?	(Parreno <i>et al.</i> 1984)
Souris	100 µT, (50 Hz), 2 h/j pdt 3 mois	Sous CEM : baisse d'une cytokine circulante dans le serum (IL-12), NS pour les autres paramètres	Pas d'effet sur la réponse inflammatoire	(Salehi <i>et al.</i> 2013).
Cochon d'inde	0,21 µT, (50 Hz), 4 h/j sur 5 j consécutifs	Sous CEM : variation significative d'ACTH et du cortisol plasmatique. Relation immunologie et endocrinologie?		(Sedghi <i>et al.</i> 2006)
Culture cellulaire	Variables	Synthèse : hypothèse que CEM (surtout si expo longue) augmente la formation de radicaux libres et donc stimule l'activation de certaines cellules du système immunitaire, car les radicaux libres sont des intermédiaires pour la phagocytose (macrophages)	Stimulation possible de l'immunité pour la thérapie	(Simkó et Mattsson 2004).

ND = non disponible ; ACTH : adrénocorticotrophine

Tableau 25 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur la physiologie du stress d'animaux modèles ou de rente.

Animaux		Resultat							
Espèce	N	Stade	CE	CM	Modalité	Durée	Mesure/Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Ruminant	12	Femelle agneaux Suffolk 8 sem	6 kV/m CTL < 6 V/m	40 mG (4 µT) CTL < 3 mG	bâtiment sous lignes THT 500 et 230 kV-60 Hz	43 sem	Cycle cortisol plasma – 8 périodes de 48 h	Aucune différence entre exposés et contrôles pour la cortisolémie moyenne et le cycle	(Thompson <i>et al.</i> 1995)
	16	Vaches Holstein en lactation	10 kV/m vertical	30 µT horizontal	Dispositif expérimental	23,5 h/j Périodes de 28 j (On/Off)	Production cortisol et progestérone plasma (2 par sem)	Pas d'effet sur le cortisol, augmentation de la progestérone	(Burchard <i>et al.</i> 2006)
Lapin	28*	Gestation (2 sem) et/ou période néonatale (6 sem)	50 kV/m	-	-	18 h/j	Euthanasie à 6 sem Organes Plasma hormones et métabolites	Aucune variation majeure dans le poids des animaux et des organes, dans la composition des organes, les métabolites plasmatiques (glucose, TG, cholestérol) et les hormones circulantes (T3, T4, GH, ACTH, insuline, cortisol et corticostérone).	(Portet <i>et al.</i> 1984)
Rat	27 40	Wistar Mâle 200-250 g	-	2 G (200 µT) (50 Hz)	Dispositif expérimental (bobines)	0, 1, 2 sem 0, 1, 2, 4 sem 24 h/j	Corticostérone (prise de sang queue)	Corticostéronémie augmente (significatif à 2 et 4 sem)	(Mostafa <i>et al.</i> 2002)
	24	Wistar Femelle 7 sem	17,5 kV/m 50 Hz	-	Dispositif expérimental (plaques)	1 h Stress de contrainte pdt les dernières 30 min	Prise de sang, veine sous-clavière (1 ml) avant et décap après (1 h)	ACTH, glucose, lactate, pyruvate. Résultats difficiles à interpréter	(Harakawa <i>et al.</i> 2004)
	20	Wistar Femelle	-	3 µT (60 Hz)	Transformateurs 220/110 500 VA	2 h/j 8h00-9h00 14h00-15h00 gestation	Ponction cardiaque sous anest. éther	Associé ou non à un régime déficient en protéines T3 et T4 diminuées cortisol non modifié	(Anselmo <i>et al.</i> 2009)
	66	Wistar Mâle	-	3 µT (60 Hz)	Transformateurs 220/110 500 VA	2 h/j 8h00-9h00 14h00-15h00 gestation	-	Associé ou non à un régime déficient en protéines retard du développement somatique et neurologique	(Anselmo <i>et al.</i> 2006; Anselmo <i>et al.</i> 2008)

Animaux				Resultat					
Espèce	N	Stade	CE	CM	Modalité	Durée	Mesure/Test	Effets sur les paramètres mesurés	Référence
Rat	32	Sprague-Dawley Mâle	525-575 V/m	0.5 mT (50 Hz)	Bobines Helmholtz	8 h/j, 5 jou Continu 6 sem	Prise de sang queue ou décap	Pas de différence sur poids corps, surrénales, thymus corticotérone basal ou post-stress mRNA POMC plus élevé expo chronique plus d'immobilité en nage forcée (chronique)	(Szemerszky <i>et al.</i> 2010)
souris	430	CD-1 Mâle 56-58 j	0, 25, 50 kV/m 60 Hz	0	Dispositif expéri- mental (plaques)	24 h/j 3 expé. 2 h 96 h 42 j	Prises de sang sinus rétro-orbital pour corticotérone	Très brève et légère augmentation de la corticotéronémie au tout début de l'exposition (5 min). Aucune modification ultérieure (y compris cycle nycthéral)	(Hackman et Graves 1981)
	30 50 37	Balb/c MF 35 j 6,5-13,5 mois 18 mois	10 kV/m 50 Hz	0	Dispositif expéri- mental (plaques)	22 h/j de la conception à la mort	Ponction cardiaque sous chloroforme + surrénales	Pas de différence entre animaux contrôls (ctl) et exposés sauf groupe des mâles adultes (exposés > ctl) Corticotéronémie et histologie cortex surrenal	(Debruyne et Dejager 1994)
	24	Swiss Mâle 6 sem	-	5 µT (3,2 à 6,8) (50 Hz)	Câbles 13 kV + transfo	24 h/j 350 j	Prises de sang sinus rétro-orbital pour NF	Leucocytose initiale chez les ctl, atténuée chez les exposés. Pas de différence biologie plasma à 28 et 90 j. Cortisolémie plus faible à 190 j.	(Bonhomme-Faivre <i>et al.</i> 1998)
	20	CD-1 Mâle 4 sem		1,5 mT (60 Hz)	Bobine	8 h/j 25 j	Décap 8 j après la fin de l'exposition	Aug corticotérone et aldostérone (+ pression artérielle), pas diff. ACTH & NA plasma et TH surrénales, diminution mRNA enzyme synthèse (surrénales), pas de diff. mRNA CRH, AVP, POMC (hypothal, hypophyse)	(Kitaoka <i>et al.</i> 2013a)+ erratum (Kitaoka <i>et al.</i> 2013b)
			Cellules Y-1 (surrénales) <i>in vitro</i>		1,5 mT (60 Hz)	Bobine	6, 12, 24, 48 h	milieu	Cort et aldo diminuent (6, 12 h) puis augmentent (24, 48 h) mRNA enzymes de synthèse augmentées à 24 h

* nombre de portées étudiées ; VA = volt ampère ; ctl = contrôle

ACTH = adrenocorticotropin hormone (corticotropine) ; AVP = vasopressine ; CRH = corticotropin-releasing hormone (corticolibérine) ; GH = somatotropine (hormone de croissance) ; NA = noradrenaline ; POMC = pro-opiomélanocortine ; T3 = tri-iodothyronine ; T4 = thyroxine ; TG = thyroglobuline



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr / [@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)

Notes
