



Rapport

Effets potentiellement générés par l'exploitation d'une ligne électrique aérienne à haute tension sur les exploitations agricoles situées à proximité

Commanditaires : ELIA-FWA

**Auteurs : Véronique Beauvois, Yves Beckers, Frédéric Rollin
ULiège**

Date : 13/07/2020

Ce rapport ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de ses auteurs de l'Université de Liège.

Table des Matières

1. Introduction	4
2. Contexte.....	5
3. Rappels sur les champs électriques et magnétiques	6
Quelques rappels de principes physiques	6
Les phénomènes de couplage électrique et magnétique.....	10
Couplage magnétique (ou inductif)	10
Couplage électrique (ou capacitif)	10
4. Méthodologie.....	11
5. Synthèse bibliographique complète	12
5.a Santé humaine - Effets potentiels des champs magnétiques EBF sur les personnes	12
5.a.1 Effets avérés.....	12
5.a.2 Effets potentiels	13
5.a.3 Types d'études sur les effets biologiques	13
5.a.4 Recommandations et réglementations pour les expositions à basses fréquences	14
5.a.4.1 Niveau international	14
5.a.4.2 Niveau fédéral belge	15
5.a.4.3 Niveau régional belge	16
5.a.4.3.a En Région flamande	16
5.a.4.3.b En Région de Bruxelles-Capitale	16
5.a.4.3.c En Région wallonne	16
5.a.5 Revue de la littérature scientifique.....	17
5.a.5.1 Position de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé).....	17
5.a.5.2 Études européennes	18
5.a.5.3 Avis de l'ANSES (France)	18
5.a.5.4 Études spécifiques sur la leucémie infantile.....	19
5.b Effets directs des champs magnétiques et électriques générés par les lignes électriques aériennes à haute tension sur les animaux et les végétaux	21
5.b.1Préliminaire.....	21
5.b.2 Intensité des champs électriques et magnétiques à proximité des liaisons électriques aériennes à haute et très haute tension et dans les exploitations agricoles	22
5.b.3 Effets des CE et CM EBF sur les animaux.....	23
5.b.3.1 Effets biologiques sur les animaux modèles et de rente.....	23
5.b.3.1.a Stress oxydatif.....	24
5.b.3.1.b Les cryptochromes.....	25
5.b.3.1.c Synthèse de mélatonine.....	25
5.b.3.1.d Le stress physiologique	26
5.b.4 Effets sur les performances zootechniques et impact sanitaire des animaux	27

5.b.5 Effets biologiques des champs EBF chez les plantes	28
5.b.6 Conclusions pour les effets directs chez les animaux et les plantes	29
5.c Santé, stress, bien-être et performances des animaux de production	31
5.c.1 Préambule	31
5.c.2 Impact sur le bien-être, la santé et les performances des animaux de production	32
5.c.3 Conclusion	35
5.d Courants parasites en élevage	36
5.e Perturbations technologiques	37
6. Réponses aux questions initiales	39
Préambule	39
Question 1	39
Analyse	39
Réponses	39
Question 2	40
Analyse pour les effets directs	40
Réponse pour les effets directs	41
Recommandation pour les effets directs	41
Question 3	43
Analyse des effets directs	43
Réponse des effets directs	43
Recommandation pour les effets directs	44
Question 4	46
Analyse pour les effets directs	46
Réponse pour les effets directs	46
Recommandation pour les effets directs	46
Question 5	47
Analyse	47
Réponse	47
7. Références et bibliographie	48
7.1 Références et bibliographie – Partie 5.a	48
7.2 Références et bibliographie – Partie 5.b	48
7.3 Références et bibliographie – Partie 5.c	50
Sites internet	51
Glossaire	51

1. Introduction

A la demande de la Fédération Wallonne de l'Agriculture (FWA) et d'Elia (Gestionnaire du Réseau de Transport d'électricité en Belgique), le présent rapport est une synthèse bibliographique des données disponibles dans la littérature scientifique examinée.

Cette synthèse porte sur les effets potentiellement générés par l'exploitation d'une ligne électrique aérienne à haute tension (courant alternatif, tension de 380 kV, capacité nominale de 6 GW) sur les exploitations agricoles situées à proximité.

Concrètement, l'analyse a pour objectif de répondre, aussi clairement que possible, aux questions suivantes :

1. L'exploitation d'une ligne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur :
 - la santé de l'agriculteur et/ou éleveur ?
 - la santé animale, le stress et le bien-être animal ?
 - les performances zootechniques ?
 - la quantité et la qualité des productions animales et végétales ?
 - l'utilisation d'équipements électroniques présents dans les exploitations (GPS, drones, tracteurs, robots de traite, abreuvoirs, etc.) ?
2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ?
Si oui, avec quelles conséquences ?
3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?
4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ?
Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

2. Contexte

Les champs électriques et magnétiques sont omniprésents dans notre environnement quotidien. La radio, la télévision, les appareils électroménagers, les appareils médicaux, les téléphones mobiles, les communications sans fil, l'internet des objets, ..., font partie de notre vie.

Une préoccupation récurrente de la population porte sur les installations électriques, et en particulier les liaisons aériennes, communément appelées lignes à haute tension (LHT), qui produisent des champs électriques et magnétiques à 50 Hz. Ce sont ces champs qu'on appelle des champs de fréquence extrêmement basse (Extrêmement Basse Fréquence – EBF ou Extremely Low Frequency - ELF).

Des recherches scientifiques sont menées depuis ces 40 dernières années sur ces sujets. Nombreuses d'entre elles ont analysé le lien potentiel entre les champs électriques et magnétiques EBF (ici 50 Hz) et la santé. Elles ne permettent pas de conclure à un lien de cause à effet entre les champs et la santé, excepté pour des effets court-terme à niveau de champ élevé, comme pour les magnétosphères (voir page 13).

Un nombre moins important d'études existent sur l'impact éventuel de ces champs sur les performances zootechniques des animaux d'élevages. Ces travaux n'ont que peu étudié les effets à long terme (*i.e.* le cycle de vie de l'animal au sein d'une ferme), de même que les effets des champs intermittents (*i.e.* présent et absent dans le temps) et variables (*i.e.* le CM est variable en fonction du taux d'exploitation de la ligne) sur les animaux.

Très peu d'études ont été menées sur l'impact éventuel de ces champs sur le rendement des productions végétales. Cette dernière constatation peut probablement s'expliquer par l'absence d'interrogation et d'observation sur le terrain.

3. Rappels sur les champs électriques et magnétiques

Quelques rappels de principes physiques

On peut d'abord se poser la question de savoir ce qu'est un **champ**. Cette notion est largement utilisée en physique : on parle de champ de pesanteur, de champ thermique, Un champ traduit simplement l'influence d'un objet sur son environnement : l'influence de la terre avec la force de pesanteur, l'influence d'une source de chaleur, ...

En électricité, on utilise les notions de **champ électrique** et de **champ magnétique**.

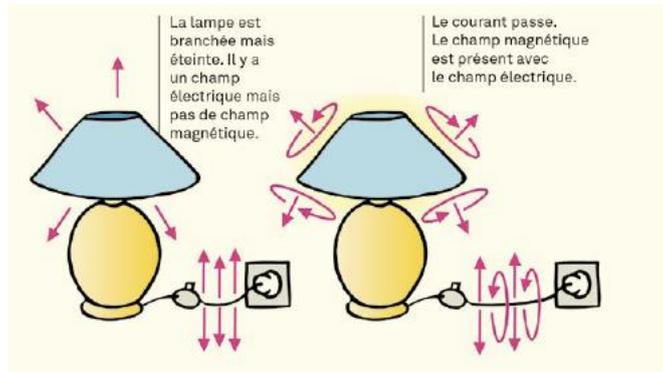
Les champs électriques et magnétiques sont présents dans la nature ; dans ce cas ils sont constants ou varient très lentement : on les appelle des **champs statiques**. On peut donner comme exemple le champ magnétique terrestre (il est de l'ordre de $40 \mu\text{T}$ dans nos régions et il en résulte des courants circulants dans le noyau terrestre) et le champ électrique naturel à la surface de la terre (généralement de l'ordre de 100 V/m , qui peut atteindre 10 kV/m , soit 100 fois plus, en cas d'orage).

Cependant la plupart des champs sont variables : on les appelle des **champs alternatifs**. Ils sont alors caractérisés par une fréquence (vitesse de leur variation, exprimée en Hertz (Hz)) et une intensité. C'est le cas des champs générés par une ligne à haute tension, dont la fréquence en Belgique est de 50 Hz, mais aussi des installations électriques domestiques et de tous les équipements qu'elles alimentent.

Le **champ électrique** traduit l'effet d'attraction ou de répulsion qui est exercé par une charge sur une autre charge (en fonction de leurs signes respectifs). On peut dire de façon simplifiée que le champ électrique est lié à la tension. La tension est exprimée en Volt (V) et le champ électrique en Volt par mètre (V/m) ou kilovolt par mètre (kV/m – soit mille fois plus qu'un V/m) ; plus la tension est grande, plus le champ électrique qui en résulte est grand. Un objet électrique sous tension génère toujours un champ électrique, même s'il n'est parcouru par aucun courant.

Le **champ magnétique** décrit la force exercée par une charge électrique en mouvement. Il se produit quand il y a déplacement de charge électrique, lorsque le courant circule. On peut dire de façon simplifiée que le champ magnétique est lié au courant. Le courant est exprimé en Ampère (A) et le champ magnétique en Ampère par mètre (A/m). Pourtant on entend plus souvent parler de Tesla (T) ou plutôt de microTesla (μT – soit un million de fois moins qu'un T) comme unité du champ d'induction magnétique ; celui-ci traduit l'effet du champ magnétique dans un milieu donné.

Dans la suite de ce rapport, par simplification, on parlera simplement de champ magnétique plutôt que de champ d'induction magnétique, ce qui ne génère pas d'erreur dans les milieux non magnétiques, comme l'air, que nous allons considérer ici dans le cas d'une liaison aérienne. Dans ce cas, il y a équivalence entre $1 \mu\text{T}$ et $0,8 \text{ A/m}$.



[GPSE]

Champ électrique-champ magnétique



Champ électrique:
Force qui s'exerce sur une charge électrique (en V/m). Le champ électrique est présent dès qu'un appareil est sous tension. (en V/m = volts/mètre)

Champ magnétique:
Force qui s'exerce sur une masse magnétique (A/m ou T). Le champ magnétique apparaît lorsqu'un courant circule. (A/m = ampères/mètre et T= teslas)

[ELIA]

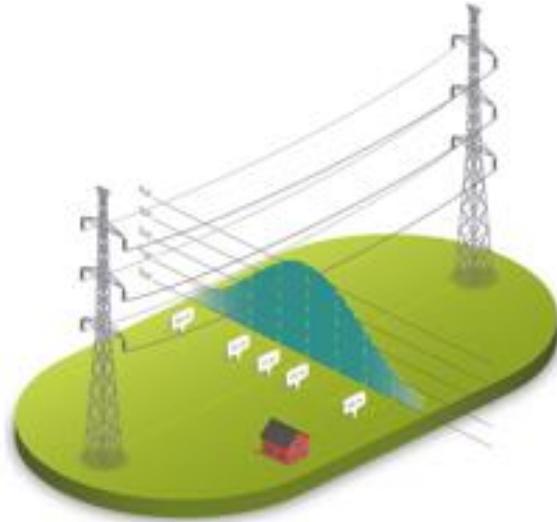
Si on se focalise maintenant sur une liaison aérienne, elle génère à la fois un champ électrique et un champ magnétique.

On peut considérer de façon simplifiée que le champ électrique maximum sous une liaison aérienne est proportionnel à la tension et inversement proportionnel à la distance entre le conducteur le plus proche du sol et le sol.

De même, le champ magnétique produit par une liaison aérienne est proportionnel à l'intensité du courant qui parcourt les conducteurs et dépend de la géométrie de la ligne (nombre de ternes¹, disposition des conducteurs, distance mutuelle des conducteurs, ...).

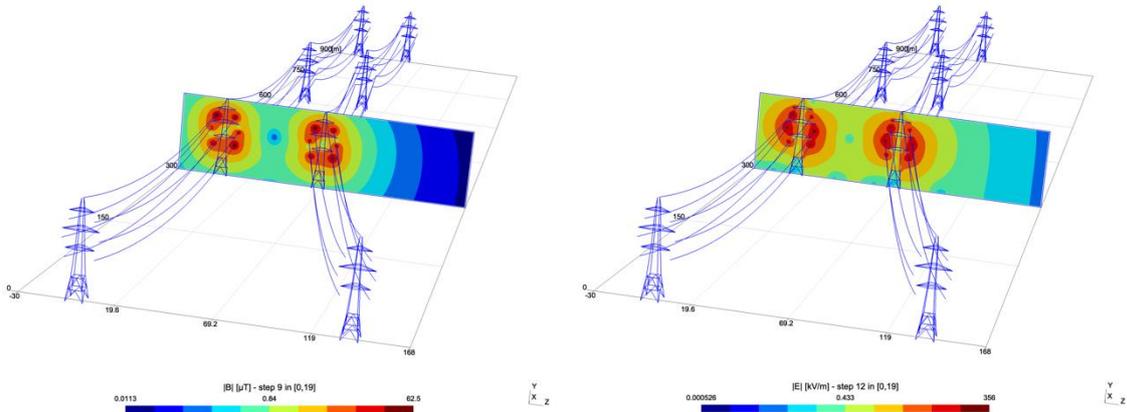
L'intensité des champs électrique et magnétique est maximale à proximité de leur source et décroît rapidement avec l'éloignement au droit de la ligne.

¹ Terne : circuit triphasé.

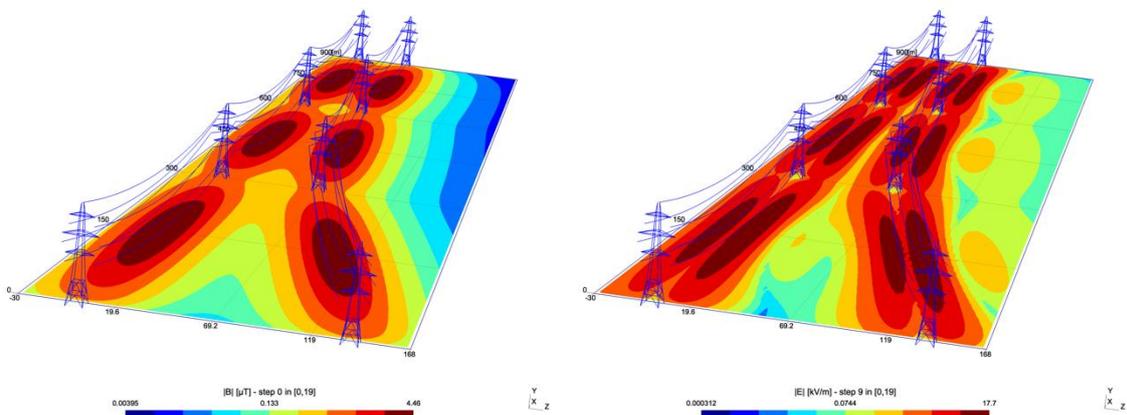


La courbe en cloche montre la répartition du champ magnétique perpendiculairement à la ligne et sa décroissance quand on s'éloigne du droit de la ligne [ELIA]

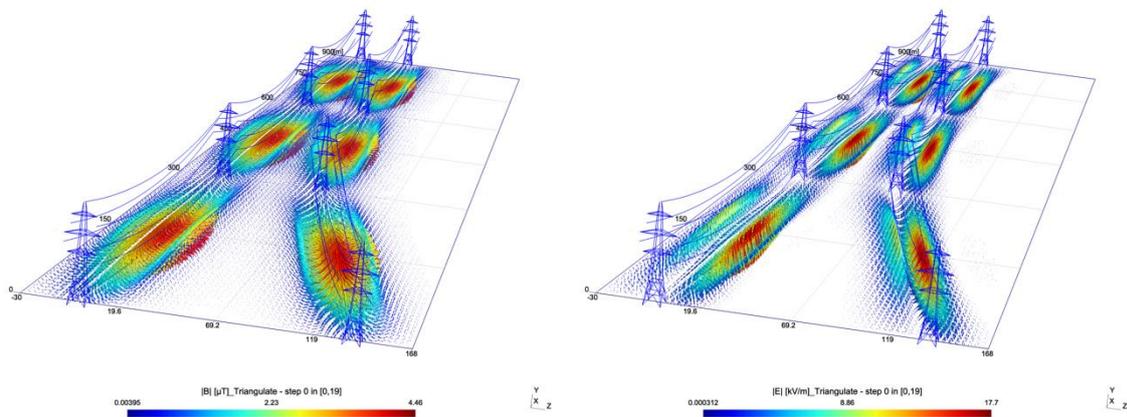
Des illustrations ont été réalisées par ACE-ULiège (Professeur C. Geuzaine) avec son code open-source ONELAB pour Open Numerical Engineering LABORatory (<http://onelab.info>).



Champ magnétique et champ électrique scalaires selon un axe.



Champ magnétique et champ électrique scalaires.



Champ magnétique et champ électrique vectoriels.

Le réseau électrique à haute tension belge est constitué de liaisons aériennes et souterraines dont les tensions s'élèvent à 380 kV (au maximum), 220 kV, 150 kV, 70 kV, 36 kV et 30 kV.

Une ligne de ce type comporte au minimum 3 conducteurs de phase (un terre), et la plupart du temps un conducteur de garde qui surplombe le terre pour protéger la ligne de la foudre.

Ce rapport s'attache aux liaisons aériennes de 380 kV.

Il est intéressant de comparer la valeur du champ électrique et du champ magnétique pour des équipements domestiques et d'élevage et des liaisons électriques aériennes.

Exemples de champs électriques et magnétiques à 50 Hz²

...pour des équipements domestiques et d'élevage		...pour des lignes électriques aériennes	
Champs électriques (en V/m)	Champs magnétiques (en µT)	Champs électriques (en V/m) ^a	Champs magnétiques (en µT) ^a
Chaîne stéréo ^a : 180	Rasoir ^b : 15 à 1500	Ligne à 400 000 volts sous la ligne : 5000 à 30 mètres de l'axe : 2000 à 100 m de l'axe : 200	Ligne à 400 000 volts sous la ligne : 25 à 30 mètres de l'axe : 10 à 100 m de l'axe : 0,6
Sèche-cheveux ^a : 80	Sèche-cheveux ^b : 18	Ligne à 225 000 volts sous la ligne : 2000 à 30 mètres de l'axe : 500 à 100 m de l'axe : 50	Ligne à 225 000 volts sous la ligne : 12 à 30 mètres de l'axe : 2 à 100 m de l'axe : 0,2
Grille-pain ^a : 80	Refroidisseur du tank à lait ^a : 0,1 à 2,2	Ligne à 90 000 volts sous la ligne : 1000 à 30 mètres de l'axe : 100 à 100 m de l'axe : 10	Ligne à 90 000 volts sous la ligne : 9 à 30 mètres de l'axe : 1 à 100 m de l'axe : 0,1
Tank à lait ^d : 10	Trayeuse (pompe à vide) ^c : 0,3 à 2,3	Ligne à 20 000 volts sous la ligne : 250 à 30 mètres de l'axe : 10 à 100 m de l'axe : négligeable	Ligne à 20 000 volts sous la ligne : 6 à 30 mètres de l'axe : 0,2 à 100 m de l'axe : négligeable
Télévision à écran plat ^a : 1	Grille-pain ^d : 0,4	Ligne à basse tension sous la ligne : 1,2 à 30 mètres de l'axe : négligeable à 100 m de l'axe : négligeable	Ligne à basse tension sous la ligne : 1,3 à 30 m de l'axe : négligeable à 100 m de l'axe : négligeable
Ordinateur à écran plat : négligeable	DAC ^c : 0,3 à 0,4	Le champ électrique produit par les lignes aériennes est nul à l'intérieur des bâtiments.	
Rasoir ^d : négligeable	Ordinateur à écran plat ^b : 0,20	Sources : ^a Office fédéral pour la protection contre les rayonnements, Allemagne, 1999, cité par OMS	
Trayeuse ^d : négligeable	Chaîne stéréo ^b : 0,20	^b Belgian BioElectroMagnetis Group, s.d.	
DAL ^d : négligeable	Télévision à écran plat ^b : négligeable	^c Anses, 2015 (p. 37-38)	
		^d Ministère de l'Agriculture et al, 2003	
		^e Anses 2017, p. 9	
		^f Ineris, s. d. et RTE, 2018. Il s'agit de valeurs maximales.	
		Pour tous les équipements, les valeurs sont mesurées à 30 cm, sauf pour les appareils qui impliquent une utilisation rapprochée.	

[GPSE]

² Ce sont des ordres de grandeur, en valeurs maximales de champs électriques et magnétiques. Cette comparaison ne tient pas compte des durées d'exposition, qui peuvent impacter les valeurs moyennes.

Les phénomènes de couplage électrique et magnétique

L'induction de tensions ou de courants dans des objets métalliques proches des liaisons électriques constitue un des principaux effets des champs alternatifs. Ce phénomène, appelé couplage, est à l'origine de courants parasites, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

On parle de couplage magnétique ou inductif pour le champ magnétique et de couplage électrique ou capacitif pour le champ électrique.

Couplage magnétique (ou inductif)

Le champ magnétique généré par une ligne électrique induit des tensions sur des éléments métalliques proches. Celles-ci sont tout à fait négligeables sur des éléments qui ne dépassent pas quelques dizaines de mètres de long. Elles deviennent importantes, cependant, lorsqu'il y a parallélisme et proximité **sur plusieurs centaines de mètres**. C'est le cas, par exemple, pour les canalisations métalliques (par exemple eau, gaz ...), les circuits de télécommunication sur support métallique, les charpentes métalliques de bâtiment, les barrières métalliques, ... Cette problématique est bien connue et les sollicitations peuvent être calculées avec une bonne précision.

Couplage électrique (ou capacitif)

Au même titre que le courant dans une ligne peut induire des tensions par couplage magnétique dans une structure métallique adjacente, la tension de la ligne peut influencer par couplage électrique des objets conducteurs situés dans son voisinage.

Ce phénomène présente en règle générale moins d'inconvénients ou de risques que le couplage magnétique mais il est plus facilement perceptible même sur des objets de petites dimensions. Il peut aussi être perçu par l'homme ou l'animal, principalement par le léger mouvement des cheveux ou des poils qu'il provoque.

La mise à la terre de l'objet subissant l'influence capacitive suffit à supprimer tout effet.

Dans le cas d'une liaison électrique souterraine, le champ électrique est confiné à l'intérieur des câbles et il n'y a pas de couplage capacitif. Seules les liaisons aériennes peuvent être à l'origine de couplages électriques.

4. Méthodologie

Cette étude a été menée par 3 membres de l'Université de Liège :

- Véronique Beauvois, Ingénieur, Maître de conférence, Applied and Computational Electromagnetics (ACE) ;
- Yves Beckers, Professeur ordinaire, Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT), Precision Livestock and Nutrition;
- Frédéric Rollin, Professeur, Faculté de Médecine Vétérinaire, FARA, Productions animales durables (Bovins, Alimentation et Maladies respiratoires).

La méthodologie de recherche utilisée est une étude bibliographique qui se base à la fois sur la littérature scientifique et non scientifique (*i.e.* littérature grise) collectée par les auteurs de cette étude. Elle se focalise sur les effets des champs électriques et magnétiques sur les hommes, les équipements, les animaux et les végétaux à proximité des lignes à haute tension. Elle propose aussi une synthèse sur les mécanismes d'action des champs au niveau animal et végétal.

La littérature scientifique a été collectée dans la base de données SCOPUS© (Elsevier). La littérature non scientifique a été obtenue à l'aide de moteurs de recherche généraliste sondant les documents disponibles sur le WEB, elle intègre aussi les rapports de synthèse sur le sujet réalisés par des organismes à finalités scientifiques.

Dans les 2 cas, les recherches bibliographiques ont été principalement réalisées par l'utilisation de mots clés pertinents pour le sujet.

Enfin, l'étude bibliographique s'est basée sur des rapports d'expertise collective dont ceux de l'OMS, l'EFHRAN, l'ANSES et du SCENHIR (voir Glossaire en fin de rapport).

5. Synthèse bibliographique complète

La méthodologie de recherche appliquée à la littérature scientifique disponible a permis de récolter de nombreux éléments dont une synthèse est réalisée et référencée ci-dessous.

5.a Santé humaine - Effets potentiels des champs magnétiques EBF sur les personnes

Avant d'aborder en détail ce sujet, nous voudrions rappeler qu'il ne faut pas confondre effets biologiques et risque pour la santé.

Les **effets biologiques** sont des modifications mesurables en réponse à un stimulus (par exemple : l'exposition aux champs électromagnétiques EBF ou l'exposition à la lumière du soleil). Les effets biologiques ne sont pas nécessairement néfastes pour la santé. Le corps humain dispose de mécanismes de compensation et de régulation à l'égard de nombreux stimuli.

Il existe un **risque pour la santé** lorsque l'effet biologique dépasse les possibilités de compensation normale de l'organisme et entraîne une altération de l'état de santé.

On sait que si on est exposé à des niveaux élevés de champs, des effets biologiques se produisent, ce sont les **effets avérés**. Par contre, à des niveaux plus faibles, les résultats des études scientifiques sont contradictoires et controversés, il s'agit des **effets potentiels**.

5.a.1 Effets avérés

La plupart des tissus constituant le corps humain sont bons conducteurs de courant électrique.

Par ailleurs, tout élément conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège de tensions induites. Le corps humain n'échappe pas à cette règle. Selon la résistivité de chaque tissu soumis à ces tensions, il en résulte également des courants électriques induits. De tels courants induits peuvent aussi être provoqués par un champ électrique.

Sachant que les tissus les plus sensibles sont les tissus nerveux qui peuvent être microscopiques (terminaisons nerveuses...), on s'intéresse plus particulièrement à la densité de tension induite qui s'exprime en V/m, c'est-à-dire au **champ électrique interne** (par opposition au champ électrique ou magnétique externe).

Lors d'une exposition à des champs électriques et/ou magnétiques 50 Hz **d'intensité très élevée**, des effets directs peuvent apparaître (voir ci-dessous). Ces effets ont été étudiés sur des volontaires humains et chez l'animal. Les normes et recommandations nous protègent de ces effets avérés directs. Les effets directs dépendent de l'intensité du champ électrique induit dans chacun des tissus qui composent notre corps.

La question à se poser est donc : quelle est la valeur du champ électrique interne maximal et, partant, le niveau maximum de champ magnétique (ou électrique) externe correspondant qui n'occasionnera aucun effet biologique néfaste pour la santé ?

Les recherches ont montré que les premiers effets biologiques se manifestaient sur la rétine à partir de champ électrique interne de l'ordre de 100 mV/m. Ces effets réversibles - et donc non dangereux pour la santé - se traduisent par la perception de légers scintillements lumineux appelés magnétophosphènes. Des magnétophosphènes apparaissent sous des champs externes de 3.000 μ T (pour des normes à 100 ou 200 μ T) et 50 kV/m (pour des normes à 5 kV/m).

Il existe également de nombreux effets avérés sur le système nerveux (stimulation directe des tissus nerveux et musculaires).

Des études scientifiques montrent également que certaines fonctions cérébrales telles que le traitement visuel et la coordination motrice peuvent être affectés, de manière transitoire, par des champs électriques induits.

Tous ces effets ont des seuils en dessous desquels ils n'apparaissent pas et peuvent donc être évités en respectant certains niveaux de champs électriques induits dans le corps.

5.a.2 Effets potentiels

De nombreuses questions se posent encore quant aux conséquences de l'exposition aux champs électriques et magnétiques 50 Hz sur la santé humaine, particulièrement l'exposition à **long terme aux faibles niveaux d'intensité** souvent rencontrés dans notre vie quotidienne.

Les préoccupations de la population sont nombreuses : maux de tête, troubles du sommeil, cancers, maladie d'Alzheimer, ...

En l'absence de vérification scientifique formelle, ces préoccupations sont toujours classées dans les effets potentiels, même si le sujet a été étudié pendant près de 40 ans (voir 5.a.3 ci-dessous).

5.a.3 Types d'études sur les effets biologiques

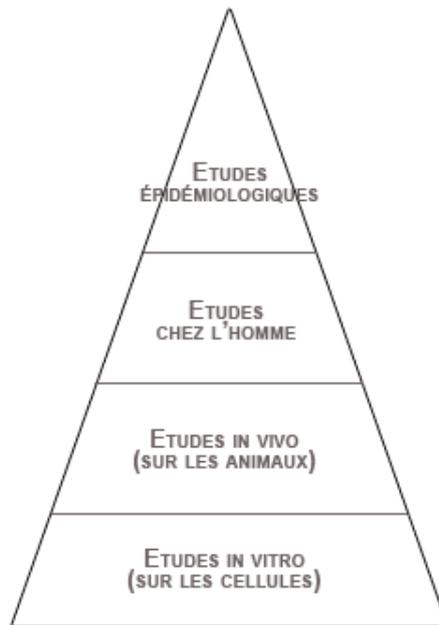
Depuis près de 40 années, des études scientifiques ont été menées afin de déterminer si les champs de très basses fréquences ont un effet potentiel sur la santé humaine.

Ces études sont de différents types :

- études in vitro (au niveau cellulaire),
- études in vivo (sur des animaux de laboratoires),
- études in toto (sur des volontaires humains),
- études épidémiologiques (statistiques).

Chacun de ces types d'études apporte des informations sur le sujet, informations souvent complémentaires (*weight of evidence approach*). En effet, chacune de ces études présente des avantages et des inconvénients. On peut évoquer les biais³ et la difficulté à démontrer une causalité dans les études statistiques, la difficulté de transposer une étude sur l'animal vers l'homme (différences physiologiques, comparaison des doses difficile), les aspects éthiques, ... La plupart de ces études n'a montré aucun effet avéré sur la santé, ou des effets difficilement reproductibles (en effet une étude isolée est une bonne base pour une hypothèse, mais elle doit être répliquée pour confirmer les résultats).

³ Parmi les biais des études épidémiologiques, on peut citer les biais d'information. Par exemple quelle grandeur faut-il mesurer ? Est-ce le champ d'induction magnétique, la consommation électrique ? Quel paramètre de cette grandeur faut-il considérer ? La valeur moyenne, médiane, de crête ? Où faut-il mesurer ? Devant la maison, dans la maison, dans la chambre à coucher ? Quel seuil faut-il considérer ? 0,2 μ T, 0,3 μ T, 0,4 μ T ? Il y a aussi les biais de sélection, comme par exemple la sous-représentation de sujets de niveau socio-économique défavorisé ou le refus de certains de répondre à un questionnaire.



[BBEMG]

5.a.4 Recommandations et réglementations pour les expositions à basses fréquences

5.a.4.1 Niveau international

L'**ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, en français Commission Internationale pour la Protection contre les Radiations Non Ionisantes) est un organisme constitué d'experts scientifiques indépendants, dont le but est de surveiller et de disséminer les aspects importants des effets potentiels sur la santé des êtres humains à l'exposition des rayonnements non ionisants, dont les champs électromagnétiques très basses fréquences font partie. C'est en coopération avec l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) qu'ils publient des recommandations qui prennent en compte les effets sur la santé qui ont été scientifiquement établis.

Les recommandations relatives aux champs électriques et magnétiques variables ont été publiées en 1998 [1] et confirmées en 2010 [2].

Les recommandations en la matière sont basées sur :

- Les effets avérés (de la perception d'un léger picotement à la surface de la peau jusqu'à des désagréments plus importants) qui peuvent être causés par l'exposition aux champs électriques EBF.
- L'induction de phosphènes dans la rétine par les champs magnétiques EBF peut être utilisée comme modèle pour repérer les effets des champs électriques induits sur le système nerveux central.

Ces recommandations fixent des limites exprimées en termes de **restrictions de base**. Malheureusement ces valeurs sont exprimées dans des grandeurs non mesurables (densité de courant induite en mA/m² ou champ électrique interne en V/m). Sur base de modèles mathématiques, ces restrictions de base ont été converties en **niveaux de référence**, qui correspondent au niveau des champs (électriques et magnétiques) qui induisent ces valeurs limites non mesurables. Le respect de ces niveaux de référence garantit le respect des restrictions de base. Par contre, si les champs mesurés ou calculés dépassent les niveaux de référence, cela ne veut pas nécessairement dire que les restrictions de base ne sont pas respectées, il faudra le vérifier.

Les valeurs de champs à 50 Hz de ces recommandations sont les suivantes :

- Pour l'exposition aux champs électriques, le niveau de référence à ne pas dépasser pour la population est de 5.000 V/m (5 kV/m) ;
- Pour l'exposition aux champs magnétiques, le niveau de référence à ne pas dépasser pour la population est de 200 μ T.

Sur base des recommandations de l'ICNIRP et de la littérature publiée, le **Conseil de l'Union Européenne** a publié une recommandation 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) [3].

A la fréquence de 50 Hz, les effets pris en compte concernent l'influence sur les fonctions du système nerveux due aux courants induits dans le corps ; les limites à cette fréquence sont de :

- 5.000 V/m (5 kV/m) pour le champ électrique et
- 100 μ T pour le champ d'induction magnétique.

Cette dernière valeur est donc inférieure d'un facteur 2 au niveau de référence recommandé actuellement par l'ICNIRP (100 μ T en 1998 et 200 μ T en 2010) qui se base sur une modélisation plus précise du corps humain permettant de prendre en compte des facteurs de sécurité (incertitudes) moindres.

Plusieurs pays européens ont adopté des limites identiques, ou pratiquement identiques, à celles reprises dans la recommandation du Conseil de l'Union européenne, comme l'Allemagne, la France, le Luxembourg et les Pays-Bas⁴.

Limites d'exposition à 50 Hz

Réglementation / Recommandation	Champ électrique	Champ d'induction magnétique
	kVolt par mètre (kV/m)	microtesla (μ T)
Belgique	5, 7 ou 10	pas de valeur
Conseil U.E.	5	100
ICNIRP	5	200

5.a.4.2 Niveau fédéral belge

Jusqu'à présent, il n'y a pas de législation au niveau fédéral belge en ce qui concerne les champs d'induction magnétique EBF générés par les installations de transport et de distribution d'électricité. Il est d'usage de se référer à la Recommandation du Conseil de l'Union Européenne pour l'exposition du public (100 μ T) [3].

Par contre, la limite du champ électrique généré par les installations de transport et de distribution d'électricité est fixée par un arrêté ministériel du 20 avril 1988 (publié au Moniteur belge du 6 mai 1988) (RGIE, art. 139) aux valeurs suivantes :

- 5.000 V/m (5 kV/m) dans les zones habitées ou qui sont destinées à l'habitat dans le plan de secteur,
- 7.000 V/m (7 kV/m) au surplomb des routes,
- 10.000 V/m (10 kV/m) dans les autres lieux.

⁴ Comparison of international policies on electromagnetic fields, National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands, 2018.

Il s'agit de valeurs maximales, en régime non perturbé, mesurées à 1,50 m du sol ou des habitations.

5.a.4.3 Niveau régional belge

5.a.4.3.a En Région flamande

L'Arrêté de la Région flamande du 11 juin 2004, modifié le 13 juillet 2018, concerne les mesures de lutte concernant les risques pour la santé par les **pollutions intérieures**. Cet arrêté stipule des valeurs de qualité pour différents facteurs chimiques, physiques et biotiques pour l'environnement intérieur. Pour les champs magnétiques, les valeurs suivantes sont retenues : valeur guide de 0,4 μT et valeur d'intervention (ou valeur déclenchant l'action) de 20 μT .

5.a.4.3.b En Région de Bruxelles-Capitale

Il n'y a pas de législation générale dans cette région. Il y a un arrêté du 9 septembre 1999 fixant les conditions d'exploitation relatives aux **transformateurs statiques** d'une puissance nominale comprise entre 250 et 1000 kVA.

- La valeur du champ électrique non perturbé, en régime non perturbé, généré par l'installation doit être inférieure à 5 kV/m ;
- A l'extérieur du local de transformation, les valeurs de l'induction magnétique 50 Hz sont limitées à 100 μT en exposition permanente et à 1000 μT en exposition de courte durée.

Une circulaire ministérielle du 29/03/2013 implique pour tout nouveau transformateur statique : *Dans tous les locaux où des enfants de moins de 15 ans sont susceptibles de séjourner, la valeur de l'induction magnétique à 50 Hz générée par l'installation, est limitée à la valeur guide de 0,4 μT en exposition permanente sur une moyenne de 24 heures, à l'exclusion des zones influencées par les câbles avant qu'ils n'entrent dans la parcelle abritant la sous-station. En cas d'impossibilités de respecter cette norme, il est du ressort du demandeur d'en apporter la preuve (impossibilité technique et économique éventuelles), et de mentionner le niveau le plus bas potentiellement réalisable selon le principe BATNEEC (Best Available Technology Not Entailing Excessive Cost), mais l'induction magnétique ne peut jamais dépasser 10 μT .*

5.a.4.3.c En Région wallonne

Il n'y a pas de législation générale dans cette région. Il y a un arrêté du 1^{er} décembre 2005 déterminant les conditions sectorielles relatives aux **transformateurs statiques** d'électricité d'une puissance nominale égale ou supérieure à 1.500 kVA :

Art. 5. Dans les zones où une exposition humaine permanente est prévisible, à l'extérieur de la zone de sécurité électrique, la valeur du champ électrique non perturbé, en régime non perturbé, généré par le transformateur reste inférieure à 5 kV/m lorsque $f = 50 \text{ Hz} \pm 1 \%$, ou inférieure à $250/f$ kV/m lorsque f est différent de 50 Hz.

Art. 6. Dans les zones où une exposition humaine permanente est prévisible, à l'extérieur de la zone de sécurité électrique, la valeur de l'induction magnétique générée par le transformateur reste inférieure à 100 μT lorsque $f = 50 \text{ Hz} \pm 1 \%$, ou inférieure à $5.000/f$ μT lorsque f est différent de 50 Hz.

5.a.5 Revue de la littérature scientifique

5.a.5.1 Position de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé)

En 1996, l'OMS a créé le Projet international sur les champs électromagnétiques afin d'étudier les risques potentiels pour la santé associés aux technologies émettrices de ces champs. Un groupe spécial de l'OMS, constitué d'experts scientifiques, a achevé en 2007 un examen des répercussions des champs EBF sur la santé. Les résultats de ce groupe ont été publiés dans un aide-mémoire (n°322, de Juin 2007) [4] qui fait le point sur les analyses concernant les effets sanitaires des champs électromagnétiques EBF publiées en 2002 par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC), et en 2003 par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP).

Tandis que le CIRC avait examiné les données concernant le cancer en 2002, ce groupe de l'OMS a, quant à lui, analysé les données concernant un certain nombre d'effets sanitaires et mis à jour celles concernant le cancer. Les conclusions et recommandations du groupe spécial sont présentées dans une monographie OMS des critères d'hygiène de l'environnement (OMS, 2007) [5].

A la suite d'un processus d'évaluation standard des risques sanitaires, le groupe spécial a conclu qu'il n'existe pas de problèmes de santé notables liés aux champs électriques EBF aux intensités généralement rencontrées par le grand public.

En ce qui concerne les effets, l'OMS distingue les effets à court terme (quasi immédiat) et les effets potentiels à long terme (sur plusieurs mois, voire plusieurs années).

A court terme, il existe des effets biologiques établis associés à une exposition à de fortes intensités qui s'expliquent par des mécanismes biophysiques reconnus. Les champs magnétiques EBF extérieurs induisent des champs et des courants électriques dans le corps humain qui, lorsque l'intensité du champ est très forte, provoquent une stimulation nerveuse et musculaire et modifient l'excitabilité des cellules du système nerveux central.

En cas d'exposition à des champs électriques et/ou magnétiques 50 Hz d'intensités très élevées, des effets directs peuvent survenir. Ces derniers sont bien étudiés chez des volontaires humains et des animaux. Tous ces effets ont des seuils en-dessous desquels ils n'apparaissent pas. Ils peuvent donc être évités en respectant les restrictions de base (voir §5.a.4.1) des champs électriques induits dans le corps.

Par contre, de nombreuses questions se posent quant aux effets sur la santé de l'exposition à long terme à des intensités faibles (de l'ordre du μT), souvent rencontrées dans notre vie quotidienne. Ces interrogations sur les effets « long terme/faibles intensités » ont été initiées par une étude menée fin des années 70. Il s'agissait d'une étude exploratoire qui, en analysant un grand nombre de paramètres différents, cherchait à comprendre l'origine de la leucémie dans l'environnement des enfants. Les champs électriques et magnétiques 50 Hz étaient une des variables étudiées. Par la suite, les études épidémiologiques ont montré, avec une certaine cohérence, une association entre les expositions résidentielles aux champs magnétiques 50 Hz à une intensité supérieure à 0,3-0,4 μT et un risque doublé de leucémie infantile, mais l'association observée seule n'est pas suffisante pour conclure à une relation de causalité.

Les recherches sur les champs de faibles intensités ont également porté sur différents types de cancers, les maladies neurodégénératives, les pathologies cardiovasculaires, la dépression, le suicide, les troubles neurocomportementaux, les troubles de la fertilité, l'hypersensibilité, les troubles du sommeil... mais sans mettre en évidence de relations causales.

Il est important de noter qu'à ce jour, aucun mécanisme d'action n'a été démontré, ni sur des cellules, ni sur des animaux de laboratoire, qui permettrait d'expliquer des risques sur la santé.

5.a.5.2 Études européennes

Voici les conclusions du "European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure" (EFHRAN) [6,7,8] :

Résultats	Force de la preuve
Cancer	
Leucémie infantile	Limitée
Tumeurs cérébrales de l'enfant	Inadéquat
Tumeurs cérébrales de l'adulte	Inadéquat
Cancers du sein de l'adulte	Absence d'effet
Autres cancers (enfant ou adulte)	Inadéquat
Maladies neurodégénératives	
Maladie d'Alzheimer	Inadéquat
Sclérose latérale amyotrophique (ALS)	Inadéquat
Autres maladies neurodégénératives	Inadéquat
Reproduction	
Tous les résultats	Inadéquat
Maladies cardiovasculaires	
Toutes les maladies	Absence d'effet
Bien-être	
Hypersensibilité à l'électricité (EHS)	Absence d'effet
Symptômes	Inadéquat

Légende :

- Limitée : preuve limitée (quand la preuve est limitée à quelques études, ou que des questions non résolues subsistent sur l'étude ou que des facteurs confondants ne peuvent pas être exclus de l'étude) ;
- Inadéquat : preuve inadéquate (quand l'étude est limitée en terme de qualité, de cohérence ou de puissance statistique) ;
- Absence d'effet.

Ces conclusions ont été confirmées par le SCENHIR dans son dernier rapport (2015) : « Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields » [9].

5.a.5.3 Avis de l'ANSES (France)

En 2010, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET qui deviendra l'ANSES) avait publié un avis de synthèse de l'expertise internationale sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques EBF. Cette expertise concluait à une forte convergence entre les différentes évaluations des expertises internationales sur de possibles effets sanitaires à long

terme, notamment concernant l'association entre l'exposition aux champs magnétiques EBF et la leucémie infantile.

Plus récemment (publications à partir de 2013), l'étude Géocap, dont l'objectif était d'étudier l'influence de différentes expositions environnementales en France sur le risque de cancer de l'enfant, a mis en évidence, chez les enfants âgés de moins de 5 ans, une association statistiquement significative entre le fait d'habiter à moins de 50 m de l'aplomb d'une ligne à très haute tension (supérieure à 225 kV) et le risque de développer une leucémie infantile. Dès lors l'ANSES a mis à jour l'expertise sur les effets sanitaires. Elle a publié en 2019 un rapport d'expertise sur les conséquences des champs électromagnétiques EBF concernant l'Homme [10]. Cette mise à jour s'est basée sur les résultats des expertises antérieures à 2010 réalisées par l'ANSES et par des organismes nationaux et internationaux et sur l'analyse systématique des études scientifiques publiées depuis 2010.

La méthodologie utilisée a permis de classer les différents effets potentiels de l'exposition aux champs électromagnétiques EBF chez l'homme. La synthèse est présentée dans un tableau qui reprend les éléments de preuve et les niveaux de preuve associés à chaque effet étudié. En dehors de la leucémie infantile où ils concluent à un effet possible, même si les études publiées après 2010 retrouvent moins fréquemment ce lien, pour tous les autres effets étudiés (tumeur du système nerveux central chez l'enfant, cancer du sein, tumeur du système nerveux central, hémopathie maligne, sclérose latérale amyotrophique, maladie d'Alzheimer et maladie de Parkinson), la conclusion est que l'ensemble des données disponibles ne permet pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs. Ces conclusions sont tout à fait similaires à celles présentées par l'EFHRAN en 2012 (voir §5.a.5.2).

Cette étude extrêmement complète est également intéressante pour les recommandations qu'elle présente concernant :

- la métrologie (mesures sous accréditation),
- la poursuite de la caractérisation de l'exposition, en particulier près des postes de transformation électrique, si plusieurs sources sont présentes,
- la réalisation de simulations a priori,
- la facilité pour les particuliers à obtenir des mesures,
- l'éloignement pour l'implantation de nouveaux lieux sensibles (hôpitaux, maternités, établissements accueillant des enfants tels que crèches, écoles maternelles, écoles primaires, etc.) des liaisons haute tension, malgré l'absence de preuve d'un lien de causalité direct,
- la poursuite des études en particulier pour les expositions professionnelles importantes et sur la leucémie infantile (notamment via des études poolées⁵).

5.a.5.4 Études spécifiques sur la leucémie infantile

Pour les effets à long terme, la plupart des recherches scientifiques se sont concentrées sur la leucémie infantile. En 2002, le CIRC a publié une monographie dans laquelle il classait les champs magnétiques EBF comme peut-être cancérigènes pour l'homme (catégorie 2-b)⁶.

⁵ Une étude poolée consiste à analyser de manière globale les données individuelles de plusieurs études indépendantes, comme s'il s'agissait d'une seule grosse étude., on parle alors d'**analyses poolées**. La combinaison de plusieurs études par méta-analyse ou analyse poolée synthétise un grand nombre d'informations et augmente la puissance statistique.

⁶ Le CIRC a évalué une large gamme de substances et d'agents quant à leur impact éventuel sur le cancer selon un système de classification comportant les catégories suivantes (Janvier 2018) :

1 – cancérigène (une centaine de substances comme l'amiante, le tabagisme actif et passif) ;

2-a – probablement cancérigène (quelques 80 substances comme l'exposition professionnelle des coiffeurs) ;

2-b – peut-être cancérigène (plus de 300 substances comme les champs électromagnétiques RF, les champs magnétiques EBF, les gaz d'échappement des moteurs à essence, le plomb) ;

3 – inclassifiable (près de 500 substances, dont le café) ;

4 – probablement non cancérigène (une seule substance, le caprolactame).

Cette catégorie 2-b est la plus basse des trois utilisées par le CIRC (Catégorie 1 cancérigène pour l'homme, Catégorie 2a probablement cancérigène pour l'homme et Catégorie 2b peut-être cancérigène pour l'homme) pour classer les agents cancérogènes potentiels en fonction des preuves scientifiques publiées.

Cette catégorie 2-b est utilisée pour caractériser un agent pour lequel on dispose d'éléments limités indiquant sa cancérogénicité chez l'homme et de données insuffisantes relatives à sa cancérogénicité chez les animaux d'expérience.

Cette classification était basée sur des méta-analyses d'études épidémiologiques (études se basant sur des comparaisons statistiques entre des populations soumises, dans leur vie quotidienne, à des niveaux d'exposition différents) démontrant un phénomène régulier de multiplication par deux du nombre de leucémies infantiles associées à une exposition moyenne à un champ magnétique 50 Hz dans les habitations supérieur à 0,3-0,4 μ T. Il faut insister que ces conclusions se basent sur des expositions moyennes à long terme (plusieurs années). Le groupe spécial a conclu que les autres études effectuées depuis lors ne permettent pas de modifier cette classification. Néanmoins, les méta-analyses les plus récentes ne montrent plus ce doublement du risque mais un rapport moindre, ces études utilisent des méthodologies plus précises, notamment en termes de mesures d'exposition.

Toutefois, les éléments épidémiologiques perdent de leur force à cause de problèmes méthodologiques (biais), comme par exemple des biais de sélection et d'information possibles. En outre, il n'existe aucun mécanisme biologique accepté qui laisserait à penser que les expositions à faible intensité jouent un rôle dans le développement d'un cancer, en effet les radiations non ionisantes ne montrent pas directement d'effets mutagènes. Ainsi, s'il y avait des effets des expositions à ces champs de faible intensité, ce devrait être par le biais d'un mécanisme biologique jusqu'ici inconnu ou des effets potentiels de co-promotion.

En outre, les études chez l'animal avec des expositions sur leur durée de vie ont été en grande partie négatives. L'OMS conclut que les éléments de preuve en rapport avec la leucémie infantile ne sont pas suffisamment probants pour être incriminés en tant que cause (pas de lien de causalité).

On sait que la leucémie infantile est une maladie rare qui, en 2000, a compté près de 49.000 nouveaux cas dans le monde. Ceci complique fortement les études épidémiologiques puisqu'il faut « suivre » une population très importante pour obtenir des résultats qui soient statistiquement significatifs. Les expositions moyennes à des champs magnétiques dépassant 0,4 μ T dans les habitations sont rares : on estime que seuls 1 à 4 % des enfants vivent dans de telles conditions. Si l'association entre champs magnétiques et leucémie infantile montrait une relation de cause à effet, le nombre de cas qui, au niveau mondial, pourraient être attribués à une exposition à un champ magnétique devrait, selon les estimations, se situer entre 100 et 2.400 par an d'après les valeurs enregistrées pour l'année 2000, ce qui représente 0,2 à 4,95 % de l'incidence totale pour cette année⁷. Ainsi, si les champs magnétiques EBF augmentaient véritablement le risque de maladie lorsqu'on les considère dans un contexte mondial, les effets d'une exposition aux champs électromagnétiques EBF sur la santé publique seraient limités.

Des effets sur la santé liés à une forte exposition à court terme ont été établis et constituent la base de deux recommandations internationales relatives aux limites d'exposition (ICNIRP, 1998 – confirmé

Cette classification est basée sur une revue des études disponibles par des groupes de travail, en se focalisant sur les aspects qualitatifs et non quantitatifs.

⁷ De telles estimations ne sont pas disponibles pour la Belgique. Deux études effectuées en Flandre rapportent des chiffres similaires, entre 1 et 2,5%.

en 2010 ; IEEE, 2002). A l'heure actuelle, ces organismes estiment que les éléments scientifiques établissant un rapport entre les effets sanitaires possibles d'une exposition à de faibles champs EBF à long terme sont insuffisants pour justifier d'abaisser ces limites quantitatives d'exposition.

Il convient de rappeler que le niveau de 0,4 μT n'est pas une norme, mais un seuil qui a été adopté dans certaines études épidémiologiques pour classer les populations.

L'OMS a donc formulé les recommandations suivantes :

- Les pouvoirs publics doivent suivre l'évolution scientifique et promouvoir des programmes de recherche permettant de réduire l'incertitude qui entoure les éléments scientifiques concernant les effets sanitaires de l'exposition aux champs EBF.
- Les États Membres sont encouragés à mettre en place des programmes de communication efficaces et ouverts avec toutes les parties concernées afin de prendre des décisions en connaissance de cause. Pour cela, il faudra peut-être améliorer la coordination et la consultation entre l'industrie, les autorités locales et les citoyens lors du processus de planification des installations émettrices de champs électromagnétiques EBF.
- Lorsqu'on construit de nouvelles installations et que l'on conçoit de nouveaux équipements, y compris des appareils, il convient d'explorer les méthodes permettant de réduire les expositions à bas coût. Les mesures appropriées de réduction de l'exposition varieront d'un pays à l'autre. Cependant, les politiques basées sur l'adoption de limites d'exposition arbitrairement faibles ne sont pas justifiées.

5.b Effets directs des champs magnétiques et électriques générés par les lignes électriques aériennes à haute tension sur les animaux et les végétaux

5.b.1Préliminaire

Cette partie du rapport se focalise sur les effets directs⁸ des champs électriques (CE) et magnétiques (CM) d'extrêmement basses fréquences (*i.e.* 50 et 60 Hz, EBF) sur les animaux élevés et les végétaux cultivés dans les exploitations agricoles à proximité des lignes électriques aériennes à haute tension.

Elle se base sur la littérature scientifique collectée par les auteurs de cette étude selon les principes définis au chapitre 4. Les articles scientifiques retenus pour réaliser cette synthèse seront cités dans la suite du document. Cette étude se base aussi sur 2 rapports scientifiques jugés pertinents et fiables par les auteurs. La recherche n'a pas été étendue aux insectes pollinisateurs, cette catégorie d'animaux n'entrant pas dans le champ de l'étude.

Le premier rapport est celui produit par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail en France (ANSES, 2015) [11]. Ce rapport émane d'un collectif de 12 experts aux compétences diverses et complémentaires⁹. Il se base sur l'analyse de plus de 300 publications scientifiques, des auditions et une campagne de mesures des champs électriques et magnétiques dans des exploitations agricoles contenant des vaches laitières, des porcs et des volailles. Le rapport d'expertise a été dans un second temps validé tant pour les aspects méthodologiques que

⁸ Les effets directs concernent uniquement les courants induits dans le corps des animaux consécutivement à l'exposition aux CE et CM. Les effets indirects concernent des courants et des tensions parasites induits par les CE et les CM sur les structures métalliques des bâtiments qui peuvent se manifester 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.

⁹ Les domaines d'expertise couvraient la physique, les champs électromagnétiques, la génétique du stress, la neurobiologie, la neurophysiologie, l'endocrinologie, la physiologie, la pathologie, la bactériologie, la parasitologie, l'épidémiologie, l'éthologie, le bien-être animal et la zootechnie.

scientifiques par un comité d'experts spécialisés constitué de 30 scientifiques français et étrangers. Cette étude ne portait pas sur les effets des CE et des CM EBF sur les plantes.

Le deuxième rapport est une étude scientifique (Malkemper et al., 2018) [12] réalisée dans le cadre d'une action européenne Horizon 2020¹⁰ mêlant l'expertise de biologistes, d'écologues et de physiciens. Son objectif était de recenser la littérature scientifique postérieure à 2000 étudiant les effets des champs électromagnétiques au sens large sur la faune et la flore sauvage. Au départ de plus de 140 publications scientifiques, 97 ont été conservées pour l'étude après l'application de critères très stricts de qualité. Dans ce rapport, les effets des CE et CM EBF sont globalement très peu abordés, particulièrement chez les animaux de rente et les plantes cultivées au sein des exploitations agricoles.

5.b.2 Intensité des champs électriques et magnétiques à proximité des liaisons électriques aériennes à haute et très haute tension et dans les exploitations agricoles

A notre connaissance, seul le rapport ANSES (2015) [11] reprend des mesures des intensités des CE et CM EBF induits par les liaisons électriques aériennes à haute ou très haute tension à proximité et dans les bâtiments d'exploitations agricoles.

La campagne de mesures réalisée montre que les CM (50 Hz) mesurés sous les lignes de transport d'électricité haute tension (HT) ou très haute tension (THT) avaient une intensité comprise entre 0,01 et 7,59 μT et que les CE (50 Hz) variaient de 46 à 5.060 V/m. Les incertitudes de mesure étaient respectivement de 11 et 17 %.

A l'intérieur des bâtiments fréquentés par les animaux dans les exploitations proches des lignes (moins de 200 m), la valeur des CM était inférieure à 3 μT et celle des CE inférieure à 43 V/m. Les mesures correspondantes dans les exploitations à l'écart des lignes (plus de 200 m) donnent des valeurs de 0 à 0,19 μT pour le CM et de 0 à 14,5 V/m pour le CE (niveau présent classiquement dans l'environnement).

Cette campagne démontrait aussi que pour un site donné proche des lignes :

- Les intensités des champs décroissaient avec la distance par rapport à la ligne. Ainsi la valeur du CM était pour un site de mesure de 7,6 μT sous les lignes et de 2,9 μT à 24 m des lignes (400/400 + 225 + 90 kV) sur un site.
- La valeur du CE était de 2.814 V/m à l'extérieur mais de 6,8 V/m dans le bâtiment sous la ligne 400 kV sur un autre site.

Par ailleurs, des sources ponctuelles de CM (large bande de 40 Hz à 10 kHz) liées aux équipements électriques ont été mesurées (valeur maximale mesurée à 30 cm de la source) dans les bâtiments des exploitations agricoles. Les valeurs les plus élevées (incertitude de 18 %) concernaient l'armoire électrique (24,00 μT), la machine à soupe (18,92 μT), le lavage du tank à lait (11,02 μT), la vis d'alimentation (10,91 μT), le compresseur (9,70 μT) et la pompe à lait (9,17 μT) selon cette étude. En outre, les valeurs ne dépassaient jamais 10 μT lorsque la mesure de l'intensité du CM était effectuée à plus d'un mètre de la source.

Durant cette campagne, la durée d'exposition des animaux aux CE et CM a été mesurée uniquement pour des vaches dans des exploitations à proximité des lignes (7 exploitations et 1 à 2 animaux par exploitation) et durant seulement 24 h. Des mesures similaires ont été réalisées dans des exploitations (5 exploitations et 1 à 2 animaux par exploitation) à plus de 200 m des lignes HT et THT mais durant cette fois uniquement 8 à 9 h. Le rapport reprend les résultats pour les différents sites. L'exposition

¹⁰ Le programme Horizon 2020 est une source de financement européenne de programmes de recherches.

d'un animal au CM est très variable au cours de la journée, en fonction notamment des activités des animaux mais aussi de la variation du ou des CM.

Au cours du nycthémère (*i.e.* période de 24 h associant la phase diurne et la phase nocturne), les animaux des exploitations proches des lignes sont potentiellement les plus exposés (*i.e.* nombre d'heures) à des CM variant de 0 à 0,42 μT et les valeurs correspondantes pour les fermes éloignées sont de 0 à 0,1 μT (un seul site sur les 5 où la valeur est de 0 à 0,42 μT). Les valeurs maximales de CM sont de 0,8 à 3 μT pour les exploitations à moins de 200 m des lignes et de 0,1 à 0,42 μT pour les exploitations à plus de 200 m des lignes.

Le rapport ANSES (2015) [11] insistait sur la nécessité de pratiquer un monitoring d'exposition des animaux aux CM internes (*i.e.* induits par le matériel électrique de l'exploitation) et externes (*i.e.* induits par les lignes électriques aériennes HT ou THT) dans les exploitations agricoles à proximité des lignes de transport de l'électricité. Ce type de monitoring permet en effet de mesurer l'intensité des CE et des CM potentiels mais aussi d'évaluer l'exposition réelle des animaux en fonction de l'environnement de l'exploitation et de leur comportement (*i.e.* position par rapport à la ou aux sources de champs). Ce monitoring paraît indispensable pour évaluer les effets biologiques et zootechniques potentiels des CE et CM EBF sur les animaux de ferme en fonction de l'intensité des champs et de la durée d'exposition.

5.b.3 Effets des CE et CM EBF sur les animaux

5.b.3.1 Effets biologiques sur les animaux modèles et de rente

Sachant que l'exposition à des CE et CM EBF est susceptible d'induire des champs et des courants électriques à l'intérieur du corps, les effets biologiques des EBF sont donc possibles chez les animaux de rente. Il faut néanmoins garder à l'esprit que le CE EBF pénètre peu dans le corps, soit un CE interne de quelques mV/m pour un CE externe de quelques kV/m selon ANSES (2015) [11]. Les effets des CE EBF sont donc essentiellement la création d'un courant superficiel au niveau du corps et un faible courant résiduel à l'intérieur du corps. A l'inverse, un CM EBF pénètre plus profondément dans le corps et est susceptible de générer un courant, mais dont l'intensité est globalement 5000 fois plus faibles que les courants naturels selon ANSES (2015) [11].

Par ailleurs, les effets des CE et CM EBF dépendant de la résistance électrique du corps, qui elle-même dépend de l'espèce animale (homme 1,5 k Ω , volailles de 19 à 2.200 k Ω , porc de 0,6 à 3,3 k Ω et bovins de 0,2 à 0,9 k Ω), de facteurs individuels (trajet du courant dans le corps, composition de la masse corporelle, poids, surface de contact au sol) et environnementaux comme l'humidité (ANSES, 2015) [11]. Un champ donné aura donc des effets en fonction de la résistance corporelle de l'animal, qui varie en fonction des facteurs énoncés précédemment.

De nombreux travaux démontrent que les animaux, dont les vertébrés, sont sensibles aux champs naturels de faible intensité (*i.e.* moins de 100 μT , voire quelques μT) et que ces derniers pilotent leurs comportements (orientation, direction des trajectoires, migration...). On peut dès lors supposer que toute modification des champs par les activités de l'homme est susceptible de perturber des comportements, voire le fonctionnement, des animaux (Biasotto & Kindel, 2018) [14].

Des travaux scientifiques conduits dans ce domaine étudient divers paramètres biologiques susceptibles d'être modifiés par les champs EBF tandis que d'autres tentent de démontrer du point de vue théorique sur la base des connaissances biophysiques du fonctionnement cellulaire la possibilité d'un tel effet.

Du point de vue théorique (le fonctionnement de la cellule et les champs électriques induits au niveau cellulaire), les CM continus inférieurs à 50 μT (*i.e.* valeur du champ terrestre) ne peuvent avoir des effets biologiques importants, il en est de même pour les CM alternatifs 50-60 Hz inférieurs à 1 μT selon Adair (2000) [15].

Le principe de Adair (2000) [15] est cependant réfuté expérimentalement par Belova et al. (2007) [16] qui démontrent que de très faibles CM alternatifs (de l'ordre de quelques μT , nT voire pT) sont susceptibles d'influencer des réponses biologiques sur un modèle animal (les planaires, vers plats aquatiques) et un modèle végétal (le lin). Selon leurs études, les spins nucléaires des atomes d'hydrogène seraient les cibles préférentielles des champs EBF chez les 2 modèles biologiques.

Dans leur revue, Belova et Acosta-Avalos (2015) [17] estiment que des effets biologiques sont en réalité mesurables chez les animaux suite à l'application de CM alternatifs d'une intensité comprise entre 1 et 10 μT . Cette revue identifie des paramètres biologiques susceptibles de varier (*i.e.* sur des modèles cellulaires le plus souvent) sans pour autant démontrer que le fonctionnement de l'animal est réellement modifié.

Les mécanismes probables d'action des champs EBF sur les animaux portent sur le rythme circadien (mélatonine et/ou cryptochromes rétinien), les canaux ioniques, le matériel génétique (aberrations chromosomiques), le stress oxydatif, le système immunitaire et le stress physiologique.

5.b.3.1.a Stress oxydatif

Le stress oxydatif correspond à une agression cellulaire consécutive à l'accumulation des espèces réactives de l'oxygène (ROS), principalement, et de l'azote (REN), secondairement. Ces espèces réactives sont produites durant des réactions aérobies mobilisant les atomes d'oxygène et d'azote, respectivement. Leur homéostasie cellulaire est pilotée très finement par les antioxydants ou des enzymes dédiées car ces espèces réactives sont très réactionnelles vis-à-vis des autres molécules de la cellule. Le stress oxydatif est globalement considéré comme un facteur d'inflammation et de mutagenèse. Les espèces réactives incluent principalement des ions et des radicaux libres.

Les effets des CM EBF sur les ROS ont été revus par Wang et Zhang (2017) [18] selon la fréquence (7,5 à 75 Hz), l'intensité (50 μT à 8 mT) et la durée d'exposition (minute à 90 jours). Suivant cette revue (117 références de 1995 à 2017), des travaux démontrent une augmentation des ROS, d'autres une diminution, voire une absence d'effet sur ce paramètre. Aux dires des auteurs, les effets dépendent d'une multitude de facteurs propres au modèle utilisé (lignée cellulaire, tissus, type de ROS, ...), aux caractéristiques du champ magnétique (fréquence et intensité) et à la durée d'exposition. Lai (2019) [19] obtenait les mêmes conclusions que les précédentes en incluant dans les espèces réactives celles basées sur l'azote (RNS).

Selon l'étude Wang et Zhang (2017) [18], la littérature consultée démontre que les champs EBF sont susceptibles de modifier les ROS dans les cellules animales, mais les changements ne sont pas toujours opérés dans la même direction. De plus, de nombreux travaux étudient les effets induits par des champs d'intensité plus élevée (> 100 μT) que ceux induits par les lignes électriques aériennes HT ou THT (*cf. infra*).

Adair (2000) [15] réfutait du point de vue théorique tout effet des champs EBF sur ce paramètre. Plus récemment, Hore (2019) [20] confirme, toujours du point de vue théorique, le peu de vraisemblance d'un effet des champs EBF sur la variation des radicaux au niveau des cryptochromes de l'homme. Selon ses travaux, l'augmentation de la production de ces radicaux consécutive à un CM de 50-60 Hz de 1 μT en présence du champ magnétique terrestre serait au maximum de 10 ppm, soit une valeur

très faible. Il démontre de plus qu'une diminution de 1 μT du champ magnétique terrestre, soit la variation naturelle diurne, induirait un effet 100 à 500 plus grand que le CM EBF simulé dans son étude théorique.

5.b.3.1.b Les cryptochromes

Les cryptochromes sont des flavoprotéines sensibles à la lumière visible qui interviennent dans la régulation des rythmes circadiens au niveau cellulaire (état réduit la nuit et oxydé le jour). Ils sont par ailleurs sensibles au magnétisme (*i.e.* ils interviendraient dans la magnétoréception via leur état rédox). Ces protéines sont présentes à la fois dans le règne végétal et animal au niveau du système nerveux mais aussi des tissus périphériques. Leur synthèse et leur mode de fonctionnement pourraient être influencés par les champs magnétiques autre que le terrestre dont les EBF (Vanderstraeten, 2017) [21].

Il est acquis que l'état d'oxydoréduction des cryptochromes est modifié par une variation du champ magnétique terrestre naturel (*i.e.* champ statique) mais aussi par les CE et CM EBF (ANSES, 2015) [11].

Le rapport Eklipse concluait que certaines études suggèrent que les champs émanant des lignes électriques affectent le sens magnétique des vertébrés, mais la littérature consultée par les auteurs du rapport Eklipse ne permet pas de dissocier un effet spécifique des CM 50Hz, à ceux des harmoniques ou même aux champs électriques respectifs (Malkemper et al., 2018) [12].

De par leurs rôles sur les rythmes biologiques, dont la multiplication cellulaire, une modification des cryptochromes induite par l'environnement électromagnétique de l'animal devrait avoir des impacts sur le fonctionnement cellulaire (ANSES, 2015) [11]. Toutefois récemment, il a été démontré qu'un champ magnétique (50 Hz, 580 μT , 30 minutes) appliqué à des souris de 8 à 12 semaines ne modifiait pas l'expression des gènes *cry1* et *cry2* codant les cryptochromes dans le foie, les glandes surrénales, et l'hippocampe dorsal (Lundberg et al., 2019) [22].

5.b.3.1.c Synthèse de mélatonine

La mélatonine est une neurohormone synthétisée au départ de la sérotonine, elle-même issue du tryptophane. Elle est une hormone centrale dans la régulation des cycles biologiques chez les animaux. Elle constitue le principal repaire biologique saisonnier chez beaucoup d'animaux du fait que la seconde partie de sa synthèse se déroule principalement durant la période nocturne. Elle est par exemple déterminante pour initier la reproduction chez les petits ruminants (*i.e.* ovins et caprins) en jours descendants. Elle aurait aussi des rôles antioxydants et modulerait le système immunitaire (*i.e.* fonction immunomodulatrice).

La diminution du pic nocturne de la sécrétion de mélatonine chez les animaux soumis à un CE et CM EBF était mise en évidence dans le rapport ANSES (2015), mais en l'absence de la démonstration de son effet sur le fonctionnement cellulaire, cette perturbation était jugée non pertinente pour expliquer les effets éventuels des champs EBF chez les animaux.

Postérieurement au rapport ANSES (2015) [11], une seule étude étudiant les effets des CE et CM EBF sur la mélatonine a été identifiée. Dans cette étude, des veaux de 1 à 2 mois ont été exposés durant 1 mois en été et en hiver à un champ magnétique (50 Hz et 0,4 μT) en plus du champ magnétique terrestre (49 μT) et la concentration salivaire en mélatonine a été comparée à celles de veaux non soumis au champ magnétique alternatif. L'hypothèse de base était que le CM réduisait la production de mélatonine. Les résultats montrent que durant l'hiver la sécrétion est diminuée alors qu'elle est augmentée en été suite à l'exposition des animaux au champ supplémentaire. En outre, la diminution

est plus prononcée que l'augmentation chez les veaux soumis au champ par rapport aux animaux témoins. L'effet de CM EBF sur la mélatonine est donc fonction de la photopériode (Kolbabová et al., 2015) [23].

Les résultats de cette expérience sont repris à la figure ci-après.

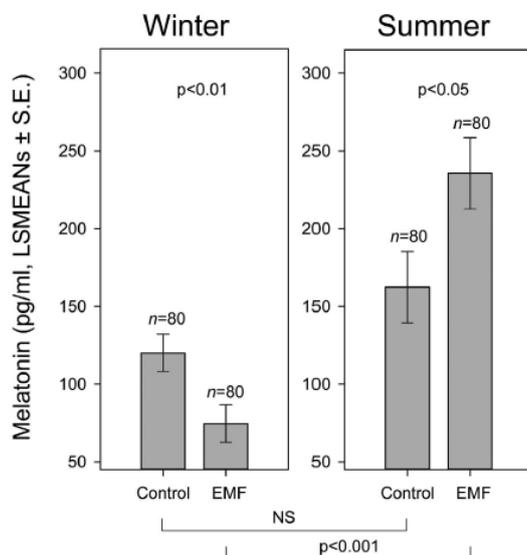


Figure 1. Melatonin concentrations (pg/ml) for control and experimental (EMF) calves (LSMEANs ± S. E.) in winter (left) and summer (right).

5.b.3.1.d Le stress physiologique

Selon l'ANSES (2015) [11], les CE (6 à 50 kV/m) et CM (4 à 30 μT) EBF sont sans effet sur les paramètres physiologiques témoins d'un stress chez les mammifères domestiques.

Les recherches bibliographiques ont identifié une seule étude postérieure à ce rapport démontrant un effet des CM EBF sur le comportement des animaux de rente.

Laszlo et al. (2018) [24] ont soumis des dindes (5 kg de poids vif) à un champ alternatif (10 μT, 50 Hz) mais de manière intermittente (20 min chaque heure pendant 3 semaines), pratiqué des observations comportementales et dosé des enzymes (en principe influencées par le stress) dans le sérum sanguin. Les résultats ont été comparés aux paramètres mesurés chez des dindes non soumises au champ.

Durant la phase test, les dindes soumises au champ exprimaient davantage d'inactivités traduisant, selon les auteurs, un comportement dépressif, mais aucun paramètre sérologique n'était différent. Ils ont par conséquent qualifié l'effet des CM EBF de « subtoxique ».

Ils ont complété leur protocole en développant un modèle *in vitro* permettant de tester les effets des CM EBF sur les récepteurs de la norépinephrine (*i.e.* noradrénaline) et démontré une diminution significative et continue des récepteurs durant la phase test.

L'intérêt de l'étude a été aussi de pratiquer les mêmes mesures (durant 5 semaines) en l'absence du champ alternatif chez les animaux préalablement soumis à ce champ afin de déterminer la réversibilité de l'effet sur les récepteurs. La conclusion est positive : le processus est réversible selon leur approche *in vitro*.

Bien que publié dans une très bonne revue (Poultry Science), il est regrettable qu'aucune donnée comportementale durant la période d'application du champ ne soit quantifiée dans l'article. De même, aucune observation comportementale n'a été réalisée durant la seconde période (*i.e.* absence de champ) : la réversibilité de la dépression des animaux n'est donc pas démontrée.

5.b.4 Effets sur les performances zootechniques et impact sanitaire des animaux

Les études de terrain (*i.e.* suivi des animaux dans des exploitations agricoles) réalisées dans les années 70 et 80 montrent que les CE et CM EBF induits pas les lignes électriques aériennes n'avaient pas d'effet sur les paramètres de production et de reproduction des bovins ainsi que sur leur situation sanitaire (ANSES 2015) [11].

Ce même rapport concluait l'absence d'effet direct des CE et CM EBF (jusqu'à 12 kV/m) sur le comportement au pâturage des bovins à proximité et sous les lignes HT et THT, hormis ponctuellement un alignement spontané des animaux durant le pâturage et le repos qui pouvait être différent (ANSES, 2015) [11].

En situation contrôlée¹¹, le rapport ANSES (2015) [11] concluait que la littérature scientifique disponible (*i.e.* jusque 2014) ne permet pas de conclure sur un effet majeur et spécifique (*i.e.* un effet significatif mesurable et induit directement par les CE et CM EBF) des CE et CM EBF sur les performances et la santé des animaux de rente (bovins, porcs et volailles), en particulier dans des intensités d'exposition inférieures à 100 μ T. Une conclusion similaire est tirée pour le comportement des animaux modèles, principalement des rongeurs car le rapport précise que les effets mesurés chez ces animaux ne le sont que pour des intensités très largement supérieures à 100 μ T.

Pour la littérature postérieure à 2014, une seule étude récente (Ruan et al., 2019) [25] a démontré chez des rats et des souris adultes que les champs magnétiques de 30, 100 et 500 μ T (50 Hz) appliqués aux animaux durant plusieurs semaines (12 à 24 semaines) à raison de 20 heures par jour ne modifiaient pas leur fertilité et le développement des embryons chez les souris.

¹¹ Par situation contrôlée, on entend que la durée d'exposition aux CE et CM EBF et l'intensité des CE et CM EBF sont mesurées et réputées constantes durant la durée de l'expérience. Le dispositif expérimental permet aussi de minimiser les courants parasites au sein de l'animal, voire de les annuler complètement.

5.b.5 Effets biologiques des champs EBF chez les plantes

Par rapport aux animaux, les plantes ne peuvent échapper aux perturbations éventuelles de leur environnement, étant immobiles. Elles ont aussi une orientation constante par rapport aux CE et CM. Enfin, leur rapport surface/volume élevé induit une exposition de plus de cellules aux perturbations de l'environnement (Malkemper et al, 2018) [12].

De nombreux travaux en laboratoire ont démontré que les graines soumises à un CM EBF (16 à 60 Hz, 0,5 μ T à 2.000 mT) durant un prétraitement (quelques secondes à plusieurs minutes) possédaient un meilleur taux de germination qui pouvait impacter la productivité ultérieure des plantes. Cet effet est cependant variable selon l'espèce végétale, voire la variété testée (Pietruszewski & Martínez, 2015) [26]. Cet effet est confirmé par la revue récente de la littérature de Radhakrishnan (2019) [27].

Teixeira da Silva et Dobránszki (2016) [28] montrent que les effets des CM EBF (50 Hz) sur la germination dépendent de la durée d'exposition ; globalement les courtes expositions (heures) ayant un effet positif contrairement aux longues expositions (jours) qui ont un effet le plus souvent négatif. Selon Pietruszewski & Martínez (2015) [26], les champs appliqués (0,5 μ T à 2.000 mT) sont susceptibles de modifier les activités enzymatiques durant le processus de germination.

Une étude de terrain a été identifiée chez les plantes et montrait que les CE et CM générés par une ligne HT (380 kV) n'a pas d'effet sur la productivité du maïs mais bien sur celle du blé d'hiver, tous deux cultivés pendant plusieurs années à proximité des lignes HT en Autriche (Soja et al., 2003) [29]. Dans le cas du blé d'hiver, les plants éloignés (40 m) de la ligne produisent 7 % de grains de plus que ceux proches de la ligne (2 m) (moyenne de 5 années, distances de 2, 8, 12 et 40 m testées et les valeurs des champs étaient de 4,0, 2,3, 1,0, et 0,2 kV/m pour le CE et 3,0, 2,9, 2,1 et 0,6 μ T pour le CM). Les auteurs démontrent par ailleurs que les différences de productions étaient les plus marquées lors des périodes de stress des cultures (*i.e.* année sèche vs humide), et affirment que globalement les différences liées à la distance par rapport aux CE et CM restent faibles par rapport aux différences induites par les variations annuelles de climat et par les caractéristiques du sol. Cette expérience a débuté 10 ans après l'installation de la ligne électrique aérienne, ce qui, aux dires des auteurs, limite les effets des perturbations du sol induites par les travaux d'installation. De plus des dispositions complémentaires avaient été prises pour limiter des variations de profil pédologique dans les parcelles expérimentales.

Suivant un dispositif similaire avec le palmier à huile en Malaisie, l'augmentation du champ magnétique (0,30 à 1,39 mT) et du champ électrique (0,14 et 60,9 10^{-2} kV/m) d'une ligne HT (275 kV 50 Hz) augmentait durant 7 ans l'activité peroxydase¹² et les pigments chlorophylliens dans la plante. Ces modifications sont considérées comme des témoins d'un stress induit par les CE et CM EBF au niveau de la plante, particulièrement à l'aplomb de la ligne (Mahmood et al., 2013) [30]. Aucune donnée sur la productivité de cette plante en fonction de la distance par rapport à la ligne n'a été fournie par cette étude. De plus, les valeurs des CM citées dans cet article¹³ semblent très élevées par rapport aux valeurs usuelles pour une ligne HT de ce type.

Aksoy et al. (2010) [31] ont montré que l'index mitotique et les aberrations des chromosomes étaient augmentés dans des cellules racinaires de 2 plantes (oignon et épeautre) cultivées à des distances décroissantes (50, 25, 10 et 0 m) par rapport à une ligne HT (380 kV et 50 Hz). Les valeurs des CE et CM EBF étaient de 4,5 kV/m et 1 G¹⁴, 3,5 kV/m et 0,8 G, 1 kV/m et 0,25 G, 0,4 kV/m et 0,1 G, à 0, 10,

¹² Les peroxydases ont des rôles multiples dont limiter le stress oxydatif au niveau cellulaire et participer à la synthèse de la paroi végétale.

¹³ Ces valeurs sont citées dans l'article à l'aplomb de la ligne.

¹⁴ G : Gauss, soit 1G vaut 0,1 mT ou 100 μ T.

25, 50 m respectivement. L'augmentation de l'index mitotique traduit un effet des CE et CM EBF sur la multiplication cellulaire tandis que les aberrations chromosomiques révèlent un effet génotoxique des CE et CM EBF. Selon ces auteurs, de tels effets doivent être considérés comme négatifs pour le fonctionnement cellulaire. A nouveau, aucune donnée sur la productivité de ces plantes en fonction de la distance par rapport à la ligne n'a été fournie par cette étude.

Les effets des CE et CM sur les plantes ont aussi été revus globalement par Dannehl (2018) [32] mais aucune information utile à ce projet n'a pu être extraite de cette revue, les champs EBF n'étant pas traités.

Aucune information pertinente pour ce travail n'a été identifiée dans l'étude Eklypse (Malkemper et al, 2018) [12]. Cette étude a été prolongée par une seconde publication (Goudeseune et al., 2018) [13] basée sur une WEB conférence. Le rapport produit les principaux enseignements de cette conférence. Parmi ceux-ci, nous retenons dans le cadre de cette étude que « le problème le plus récurrent dans les études scientifiques actuelles (dans tous les groupes taxonomiques) semblait être le manque de configurations techniques normalisées et contrôlées pour les expériences et la surveillance des niveaux et des fréquences d'exposition ».

5.b.6 Conclusions pour les effets directs chez les animaux et les plantes

Les champs électriques et magnétiques induits directement par les lignes à haute tension de 50 Hz à proximité des exploitations agricoles (*i.e.* moins de 200 m) ont été monitorés dans une étude française et ne dépassent pas à l'aplomb de la ligne les valeurs d'intensité de 8 μ T pour le champ magnétique et 5.000 V/m pour le champ électrique selon la méthodologie classique de mesure. L'éloignement par rapport à la ligne diminue rapidement l'intensité des champs.

La valeur des CM était inférieure à 3 μ T et des CE inférieure à 43 V/m dans les bâtiments fréquentés par les animaux dans les exploitations proches des lignes. Les mesures correspondantes dans les exploitations à l'écart des lignes (plus de 200 m) donnent des valeurs maximales de 0,19 μ T pour le CM et de 14,5 V/m pour le CE.

Par ailleurs, des champs magnétiques pouvant atteindre 24 μ T (40 Hz à 10 kHz) à proximité de la source (\pm 30 cm) sont induits dans les bâtiments par les appareils électriques nécessaires à son fonctionnement. Ces appareils sont susceptibles de fonctionner en continu ou par intermittence et à des distances variables selon la position des animaux dans le bâtiment.

Prenant en compte les champs potentiellement générés par les lignes, le rapport ANSES (2015) concluait à l'absence d'effet démontré sur la santé et les performances des animaux des exploitations soumis directement à ces champs.

Par rapport au rapport ANSES (2015) [11], la littérature scientifique reste partagée sur les effets ou les non effets des CM EBF de quelques μ T sur le fonctionnement des animaux mais aucun mécanisme plausible d'action n'a pu être démontré.

Il n'a pas été possible d'identifier des travaux ultérieurs à 2014 qui étudient chez les animaux de ferme les effets directs des champs EBF sur le long terme en situations parfaitement contrôlées, ni les effets des champs magnétiques lorsqu'ils sont intermittents en fonction de la quantité de courant véhiculée par la ligne.

Deux études théoriques démontrent l'impossibilité d'un effet des CM EBF de quelques μT sur le fonctionnement cellulaire chez les animaux tenant compte des champs potentiellement induits et des connaissances biophysiques actuelles.

Chez les plantes, les CM EBF de quelques μT sont susceptibles de modifier des paramètres biologiques sans pour autant avoir toujours des effets démontrés sur la production végétale. Quelques études portent sur un terme long (*i.e.* la durée de la culture du végétal) et prennent très certainement en considération les intermittences des champs magnétiques. Une seule étude montrait que le rendement d'une des 2 plantes testées était négativement impacté (moins 7 % de production pour le blé d'hiver) par la proximité de la ligne.

5.c Santé, stress, bien-être et performances des animaux de production

5.c.1 Préambule

La **résistance électrique** varie considérablement entre les différentes espèces animales mais aussi entre individus d'une même espèce, en fonction de l'environnement particulier qui caractérise les bâtiments d'élevage (humidité, structures métalliques de la charpente, des cornadis, logettes, barrières, abreuvoirs, salle de traite, paillasse à béton, ...). Ainsi, les publications consultées s'accordent généralement pour attribuer une résistance corporelle de 500 Ω pour les bovins (fourchette de 300 à 1.700 Ω selon le trajet emprunté par le courant), alors qu'elle est en moyenne 4 fois plus élevée chez le porc, 10 fois plus élevée chez le mouton et 100 à 2.000 fois plus élevée chez la volaille (Appleman et Gustafson, 1985).

Même si la perception d'un phénomène électrique témoigne de l'existence d'un dysfonctionnement électrique auquel il convient de remédier sans délai, cela ne signifie pas systématiquement perturbation de la santé et baisse de production. Nous nous focaliserons dans ce rapport sur l'espèce bovine¹⁵ du fait de son plus faible seuil de perception des courants électriques par rapport aux autres animaux de production.

Jusqu'il y a peu, le seuil de perception des phénomènes électriques chez le bovin (espèce la plus sensible du fait de sa très faible résistance) mentionnait régulièrement un courant de 1 mA, ce qui correspond, compte tenu de sa résistance très faible au passage du courant, à une tension de 500 mV (Norell et coll., 1983) [40]. C'est une valeur beaucoup plus faible que celle publiée plus récemment suite à une méta-analyse, à savoir 3 mA (Erdreich et coll., 2009) [37]. Néanmoins, il convient de prêter attention à la surface du pied qui touche le sol en premier pour créer le contact (Hultgren, 1990) [39]. Ainsi, pour un courant de 1 mA entre la tête d'une vache et ses pieds antérieurs, il va en résulter une densité de courant de minimum 250 mA/m² dans les membres antérieurs en considérant une surface de contact effective avec le sol d'au moins 20 cm² par membre. Mais avec une surface de contact de 2 cm² ou moins, les valeurs obtenues peuvent dépasser 5.000 mA/m², c'est-à-dire le seuil décrit comme pouvant influencer les potentiels de membranes des cellules (Sheppard et Eisenbud, 1977) [44]. En effet, toutes les cellules vivantes ont un potentiel de membrane dû au déséquilibre ionique (K⁺ surtout à l'intérieur des cellules et Na⁺ surtout à l'extérieur des cellules) entretenu par les pompes à Na⁺/K⁺ qui n'arrêtent pas de fonctionner et qui nécessitent de l'énergie pour ce faire. Ce potentiel de membrane de repos tourne autour de 70 mV. Pour des cellules « excitables » comme les cellules nerveuses par exemple, le seuil pour leur stimulation est de 126 V/m. Modifier le potentiel de membrane d'une cellule peut perturber son fonctionnement.

Attention aussi que les conditions expérimentales ne reflètent pas toujours les conditions de terrain. Ainsi et pour exemples, un abcès de la sole, la muraille de l'onglon fendillée, un ulcère de la peau de l'extrémité digitée (Mortellaro), une érosion suintante de la peau des articulations peuvent encore faciliter un peu plus le passage du courant au travers du bovin (Appleman et Gustafson, 1985) [35].

¹⁵ Les bovins viandeux sont tout aussi concernés que les bovins laitiers. Cependant, il se fait que ces derniers, par la force des choses (la traite deux fois par jour et leur veau qui n'est pas mis au pis de sa mère), sont plus dociles et faciles à manipuler que les bovins viandeux (la race viandeuse BBB, très commune chez nous, n'est en effet pas du tout représentative des races viandeuses à cet égard). Ce sont donc presque toujours des bovins laitiers qui sont utilisés dans les expérimentations publiées en rapport avec les champs électromagnétiques. Le cas échéant, il est aussi beaucoup plus facile de mettre en évidence un effet sur la production laitière – qui peut varier très rapidement – que sur la production de viande (Gain Quotidien Moyen, GQM).

Enfin, il convient de garder à l'esprit que ces valeurs publiées dans la littérature scientifique s'appliquent aux courants d'extrême basse fréquence (EBF à 50 – 60 Hz) censés être distribués aux consommateurs d'électricité, alors que ces courants EBF peuvent être pollués par d'autres fréquences, parfois très élevées.

Aux basses fréquences (50 Hz), les champs électriques et magnétiques restent indépendants. Pour les fréquences plus élevées (i.e. fréquences radio), les champs électriques et magnétiques sont indissociables.

5.c.2 Impact sur le bien-être, la santé et les performances des animaux de production

Les recherches étudiant l'impact des champs électromagnétiques (EM) générés par les LHT à EBF sur la santé et les performances zootechniques des animaux de production ne sont pas légion. Certaines études très rigoureuses en milieu expérimental contrôlé ne reflètent pas bien les conditions réelles rencontrées dans les élevages sur le terrain. Cela peut expliquer les résultats divergents qui peuvent être obtenus dans ces deux types d'études.

En effet, il faut bien distinguer les **effets directs** des champs EM sur les animaux eux-mêmes, ceux qui sont habituellement testés expérimentalement, des **effets indirects** qui peuvent résulter des **courants parasites** induits par ces champs EM sur les structures métalliques des exploitations (décharges électriques par contact des animaux avec ces structures métalliques). Ces courants parasites perturbent le comportement des animaux. Ils surviennent d'autant plus facilement que l'installation électrique des bâtiments est non conforme et/ou qu'elle a été modifiée/dégradée avec le temps. Une mise à la terre efficace des installations est le moyen le plus sûr d'annuler les effets de ces courants parasites. En élevage, une résistance de la prise de terre $\leq 18 \Omega$ est souhaitée, ce qui est moindre que la valeur recommandée pour la prise de terre d'une habitation (30Ω), les animaux et les bovins en particulier étant beaucoup plus sensibles aux courants parasites que les êtres humains (résistance d'un être humain chaussé de bottes 10.000Ω vs celle d'un bovin 500Ω).

Les courants parasites peuvent trouver des causes **externes** et/ou **internes** aux exploitations (ANSES, 2015). Les **sources externes** sont à rechercher dans les **courants vagabonds** (courants qui circulent dans le sol lorsque celui-ci est utilisé comme conducteur, par exemple lorsque le neutre des réseaux de distribution électrique est mis à la terre) et dans les champs EM qui entourent les lignes électriques et qui, par induction, génèrent de tels courants parasites dans les structures métalliques avoisinantes. Contrairement à l'induction magnétique (couplage inductif), l'induction électrique (couplage capacitif) est bloquée par les matériaux qui font écran aux champs électriques, comme les murs et la toiture d'une étable par exemple. Une dernière source externe de courants parasites est le **couplage de la prise de terre** de l'exploitation avec une autre toute proche, par exemple celle d'un transformateur électrique placé dans l'environnement immédiat.

Les **sources internes** à l'exploitation des courants parasites sont nombreuses et diversifiées :

- Les **courants de fuite** éventuels des divers appareils électriques (défaut de mise à la terre, absence de liaisons équipotentielles). Pour les vaches laitières, une liaison équipotentielle est satisfaisante lorsque la résistance entre 2 points ne dépasse pas $0,2 \Omega$.
- **L'effet de pile ou couplage électrochimique** : certains produits se comportent comme l'électrolyte d'une batterie (lisiers, aliments ...) en présence de métaux.
- La **décharge électrostatique** suite à l'accumulation d'électricité sur certains matériaux isolants par frottements.
- Le **rayonnement** d'appareils électriques, surtout ceux utilisant des moteurs ou qui intègrent des composants électroniques comme les variateurs de vitesse des pompes (i.e. pompes à vide des robots ou salles de traite). Ils peuvent générer des courants parasites à haute

fréquence susceptibles de perturber l'alimentation électrique des autres appareils et, par rayonnement, sans contact direct, le fonctionnement d'appareils électroniques sensibles.

- Les **clôtures électriques** - impulsions brèves (< 10 msec), à une fréquence ≤ 1 Hz mais à une tension très élevée (de 10.000 à 15.000 V) - dont la borne positive est reliée à la clôture en périphérie des bâtiments et la borne négative à une prise de terre, différente mais proche de celle de l'exploitation, utilisée comme conducteur de retour.

Selon les experts qui vérifient les installations électriques, environ 80 % des problèmes de courants parasites trouvent leur origine dans la ferme. Néanmoins, lorsque l'installation électrique de l'exploitation est aux normes, la seule source de courants parasites est alors le conducteur neutre via ses liens avec la terre. Cela permet au courant de passer par les conduites d'eau métalliques, les systèmes de protection des points lumineux etc. Les autres 20 % des problèmes électriques résultent de problèmes de qualité (transitoires et harmoniques) du courant électrique fourni à l'exploitation. Lors de pollution du courant avec des courants de hautes fréquences, la résistance de la vache diminue et l'intensité du courant qui la traverse augmente. Le comportement des vaches est affecté aux fréquences < 1.000 Hz et elles n'ont pas besoin de toucher des pièces métalliques pour être affectées par les harmoniques. Leur production laitière diminue lorsque les transitoires et les harmoniques augmentent. Des valeurs aussi faibles que 8,1 mV de tension de crête à crête (et non pas la moyenne quadratique) sont alors ressenties par les vaches. L'auteur mentionne que l'isolation du neutre par un blindage réduit les harmoniques et le courant traversant les vaches, même si on peut en douter. Leur comportement, leur santé et leur production laitière s'améliorent quand le neutre primaire est isolé dans les exploitations à problèmes (Hillman et coll., 2013) [38].

L'examen par l'ANSES (2015) [34] de la littérature scientifique ne leur a **pas** permis de mettre en évidence **d'effets directs** des champs EM sur le comportement, les performances et la santé des animaux de production. Certaines études, comme celle de Burchard et Nguyen (1996) [36], démontrent même des effets positifs chez des vaches laitières en lactation soumises dans une cage métabolique en bois à un champ électrique vertical de 10 kV/m associé à un champ magnétique de 30 μ T : augmentation de la matière sèche ingérée et de la production laitière.

L'ANSES (2015) [34] a fait mesurer les champs EM dans l'environnement des animaux d'élevage d'une trentaine de fermes situées ou non à proximité de LHT. Cela leur a permis de déterminer le niveau moyen des champs rencontrés dans ces élevages. Sous les LHT, entre 0,01 et 7,59 μ T pour les champs magnétiques et entre 46 et 5.060 V/m pour les champs électriques. Ces champs générés par les LHT étaient de plus faible intensité à l'intérieur des bâtiments d'élevage : < 3 μ T et 43 V/m, respectivement. En comparaison, les champs générés par les sources internes de ces bâtiments étaient plus importants.

Par contre, des **effets indirects (courants parasites)** sur les bovins sont mieux décrits même s'il n'est pas toujours simple de faire la part des choses entre santé et performances zootechniques qui sont en réalité intimement liées.

Dans leur article, Appleman et Gustafson (1985) [35] décrivent différentes réponses possibles des bovins aux courants parasites :

- Périodes intermittentes de baisse de production laitière.
- Production laitière insuffisante de façon inexplicée. Cela peut être la conséquence d'une réduction de la sécrétion lactée, d'un comportement perturbé durant la traite et/ou d'une éjection du lait incomplète.
- Augmentation de l'incidence des mammites.
- Taux cellulaires élevés.
- Augmentation du temps de traite.

- Vidange incomplète des pis.
- Nervosité extrême dans la salle de traite.
- Aversion d'entrer dans la salle de traite.
- Sortie rapide de la salle de traite.
- Réticence à utiliser les abreuvoirs ou les mangeoires métalliques.
- Comportement de buvée modifié.

L'ANSES (2015) complète cette liste avec les symptômes suivants :

- Tremblements,
- Poils hérissés,
- Vaches qui « lapent » l'eau à l'abreuvoir.

L'ANSES mentionne également des taux élevés de cellules somatiques dans le lait, ce qui témoigne de la présence de mammites chroniques subcliniques. Ce sujet fait néanmoins polémique et est loin de faire l'unanimité (Reinemann, 2012) [42].

Il apparaît qu'un ensemble de chocs électriques irréguliers ou intermittents est plus susceptible de modifier le comportement normal des vaches et de diminuer leur production (Rigalma et coll., 2010) [43]. Les vaches exposées de façon permanente (prévisible) peuvent s'habituer, ce qui n'est pas le cas des vaches exposées de façon aléatoire, imprévisible, qui subissent un stress chronique modéré. Il est un fait que la réponse de stress est le plus souvent chronique et qu'il convient dès lors de distinguer les effets à long terme de l'exposition à ces courants parasites de ceux qui sont observés sur le court terme (Hultgren, 1990) [39].

Un article récent particulièrement intéressant et instructif est celui de Stetzer et collaborateurs (2016) [45] qui complètent ainsi la liste des symptômes observés, associant clairement troubles comportementaux, de production et de santé :

- Piétinement incessant,
- Battements de queue intempestifs,
- Jarrets gonflés,
- Lésions des onglons qui ne répondent pas aux traitements antibiotiques,
- Mammites,
- Chute soudaine et significative de la production laitière,
- Coups de pied donnés aux trayeurs,
- Éjection incomplète et inégale du lait lors de la traite,
- Avortements,
- Veaux mort-nés,
- Boiteries,
- Mortalité de plus d'un animal sur une courte période.

De plus, à partir de l'étude approfondie et détaillée d'un cas en particulier dans une exploitation laitière du Wisconsin, ces mêmes auteurs démontrent les principales idées fausses reprises dans les études antérieures :

- 1) La valeur standard de 1 V (moyenne quadratique) au contact de la vache est adéquate pour protéger les vaches laitières.
- 2) Les fréquences supérieures à 60 Hz ne nécessitent pas d'être prises en compte.
- 3) Toutes les sources de courants parasites trouvent leur origine dans la ferme qui connaît un problème avec de tels courants.

Ils y expliquent très bien comment établir un monitoring permanent des courants parasites dans une ferme laitière (tensions de pas), comment déterminer et remédier aux sources internes et externes

qui contribuent aux tensions de pas, quelles sont les mesures de tension de pas qui influencent le bien-être des vaches et leur production laitière ainsi que leur rapport avec les standards établis.

Vu que les vaches sont sensibles aux tensions de crête et pas à la moyenne quadratique de tension (Aneshansley et Gorewit, 1999) [33], ils préconisent d'utiliser un oscilloscope pour mesurer la tension plutôt qu'un voltmètre digital.

Ils ont ainsi pu identifier les sources de courants parasites suivantes avec les valeurs de tension de crête à crête correspondantes :

- Éclairage : 300 mV,
- Ventilateurs : 200 mV,
- Pompes : 30 mV,
- Système d'identification par radiofréquence (RFID) : 600 mV,
- Source externe à la ferme : > 500 mV (pas de façon continue mais bien intermittente).

Le spectre de fréquences enregistré indiquait des fréquences jusqu'à et probablement supérieures à 10 kHz (> 166^e harmonique de 60 Hz – car étude américaine). Or, une fréquence de 60 Hz à une tension de 1 V a la même énergie qu'une fréquence de 60 kHz à une tension de 1 mV. Aux fréquences élevées, la résistance de la vache est diminuée et au-dessus de 1,7 kHz, le courant peut entrer à l'intérieur du corps, pouvant y entraîner des lésions au niveau des organes internes comme il en est observé lors des autopsies (Reilly, 1992) [41].

L'amélioration observée par ces auteurs en termes de production laitière était de + 1,3 kg de lait/vache/jour lorsque l'éclairage était coupé dans la salle de traite (plus de lait et temps de traite plus court, moins de vaches qui « dansaient » dans la salle de traite) et de 0,8 kg supplémentaire après le bypass des ventilateurs de l'étable (les vaches passaient plus de temps couchées dans la stabulation libre, ce qui va de pair avec une meilleure production laitière). La qualité du lait n'a par contre pas été modifiée de façon appréciable.

Ils suggèrent ainsi que des tensions transitoires aussi faibles que 10 mV (crête à crête) peuvent influencer négativement la production laitière et la santé des vaches. En 2013, Hillman et collaborateurs arrivaient déjà à la même conclusion. Les auteurs recommandent également qu'un monitoring soit installé en continu pour déterminer les sources externes de courants parasites, vu que ceux-ci peuvent très bien n'être qu'intermittents. Ils dénoncent aussi le fait que, pour évacuer le courant en excès, la terre soit parfois utilisée comme un conducteur permanent supplémentaire dans le circuit de distribution en lieu et place de câbles électriques bien isolés. Il en résulte que des courants s'écoulent alors de façon incontrôlée à la surface de la terre (courants vagabonds). Cette situation est relativement fréquente aux États-Unis.

Néanmoins, il convient de considérer ici que les réseaux électriques sont différents en Belgique par rapport aux États-Unis. Le neutre des transformateurs étant relié à la terre en Belgique (réseau TT) tandis que le neutre et la terre sont confondus aux États-Unis afin de faire l'économie d'un câble (réseau TN-C).

5.c.3 Conclusion

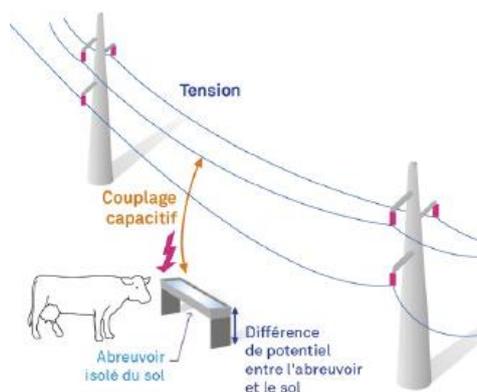
En conclusion, il convient de bien distinguer les **effets directs** d'une LHT sur la santé et les performances des animaux de production logés en étable des effets que cette ligne peut leur occasionner **indirectement**, en particulier lorsque l'installation électrique de l'exploitation n'est pas conforme bien qu'elle ne connaissait pas de problème particulier avant la mise en service de la ligne.

Concernant les **effets directs** délétères des champs EM générés par les LHT sur le comportement, les performances et la santé des animaux de production, aucune étude n'en démontre de façon probante. Au contraire, quelques-unes ont même établi des effets positifs chez des vaches laitières qui ont vu leur consommation de matière sèche et, partant, leur production laitière augmenter quelque peu.

Par contre, des **effets indirects** néfastes peuvent très bien se manifester suite à la présence de **courants vagabonds** induits sur les structures métalliques des exploitations mal raccordées à la terre, en commençant par des troubles du comportement, suivis par une baisse de leur production chez les vaches laitières, voire une dégradation progressive de leur état de santé pouvant mener à la mort dans les cas les plus extrêmes.

5.d Courants parasites en élevage

En France, le GPSE (Groupe Permanent pour la Sécurité Électrique en milieu agricole) a beaucoup travaillé sur la problématique et intervient régulièrement dans des dossiers et des questions du monde agricole français. Une première brochure avait été publiée en 2000 sur les risques liés aux courants parasites en élevage. Une mise à jour a été publiée en 2019¹⁶ notamment pour tenir compte des évolutions dans les exploitations agricoles avec le développement des équipements électriques et électroniques, la robotisation, et l'augmentation du nombre de structures métalliques.



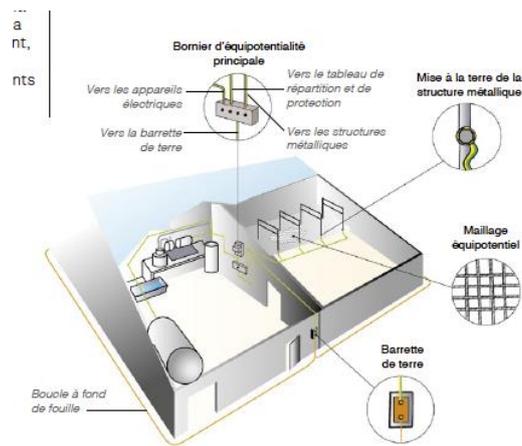
[GPSE]

Comme mentionné au paragraphe précédent, les champs électriques et magnétiques interagissent avec les structures métalliques à proximité (phénomènes d'induction). On peut considérer que cela est d'application dans les 50 premiers mètres. Évidemment pour une évaluation précise, il faut faire un calcul au cas par cas en fonction de la distance, du courant moyen, de la longueur de la structure métallique, de son orientation par rapport à l'axe de la ligne, ... Dans ce cas, il est essentiel de respecter les **règles pour une « bonne » installation électrique**.

Dans les exploitations agricoles, certains phénomènes peuvent avoir des impacts, comme les intempéries, l'humidité, les poussières, la corrosion, ... tout ceci accélère le vieillissement et la dégradation des diverses structures métalliques (exemples : cornadis, abreuvoirs, clôtures) et diminue la qualité des mises à la terre, des mises en contact, ...

Il est donc essentiel d'assurer une bonne qualité des liaisons équipotentielles et de la liaison à la prise de terre des masses de l'exploitation, et de l'assurer dans le temps. Si des structures métalliques sont longues (plus de 10 m), des mises à la terre régulières sont nécessaires (tous les 10 m).

¹⁶ Courants électriques parasites en élevage – Connaître et maîtriser, GPSE, 2019.

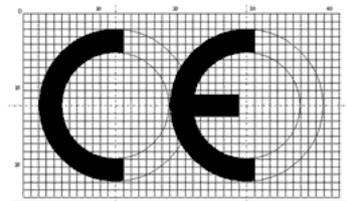


[GPSE]

5.e Perturbations technologiques

Au niveau réglementaire, en Europe, des directives européennes règlent les questions de sécurité électrique¹⁷, de compatibilité électromagnétique¹⁸ et de conformité des équipements radioélectriques¹⁹. Ces directives ont été transposées dans la législation belge.

Ces législations s'appliquent à **tous** les équipements électriques et électroniques, y compris ceux présents dans les exploitations agricoles. On peut citer de nombreux exemples comme les robots de traite, les distributeurs automatiques, les machines agricoles, ... y compris ceux munis de systèmes radiofréquences comme les GPS, les RFID, ...



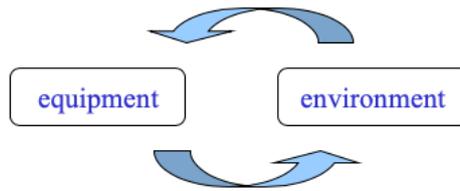
[Commission Européenne]

Plus particulièrement, la compatibilité électromagnétique s'intéresse aux fonctionnements des appareils électriques et électroniques dans leur environnement. En effet, un appareil électrique peut être perturbé par un champ électromagnétique émis par un autre équipement (émission), se situant dans l'environnement de celui-ci (immunité). Ces perturbations sont communément appelées interférences électromagnétiques.

¹¹ 2014/35/UE : Directive 2014/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché du matériel électrique destiné à être employé dans certaines limites de tension.

¹⁸ 2014/30/UE : Directive 2014/30/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique.

¹⁹ 2014/53/UE : Directive 2014/53/UE du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE.



[V. Beauvois, ACE - ULiège]²⁰

Les directives européennes font référence à des normes techniques (normes européennes harmonisées) pour démontrer la conformité. Dans le cas de la compatibilité électromagnétique, les normes harmonisées sont des normes produits ou familles de produits ou génériques (liées à l'environnement dans lequel l'équipement électronique fonctionne) qui font elles-mêmes références à des normes de base.

Parmi les normes de base qui concernent l'immunité, la norme internationale CEI²¹ 61000-4-8 se rapporte aux champs magnétiques à la fréquence du réseau (50 Hz en Europe). La majorité²² des normes de conformité produits font référence à cette norme de base.

La plupart des équipements électriques et électroniques ne sont pas sensibles aux champs magnétiques 50 Hz générés par des sources, comme des liaisons électriques aériennes à haute tension. Auparavant, on connaissait la sensibilité des écrans cathodiques d'ordinateurs et des téléviseurs à ces champs (ce qui n'est plus d'application pour les écrans « modernes ») ; maintenant, seuls les équipements comportant des circuits sensibles aux champs magnétiques basse fréquence sont concernés par ce type de perturbations (exemple : capteur inductif, capteur à effet hall inclus dans des équipements comme certains systèmes de pesage, des boucles inductives pour des parkings ou pour confiner une tondeuse autonome).

On peut ajouter qu'une réglementation existe également pour les systèmes radiofréquences (exemples : GSM, GPS, RFID, Bluetooth, Wi-Fi, ...). Ils sont soumis aussi à des règles de performances (limitation par exemple de leur portée d'émission), de sécurité et de compatibilité électromagnétique, tout cela via la directive mentionnée ci-avant Directive 2014/53/UE et de nombreuses normes spécifiques régies par l'ETSI²³ au niveau européen.

Par conséquent, si les équipements électroniques au sens large utilisés dans les exploitations agricoles sont bien conformes à la législation en vigueur (en Europe, marquage CE et déclaration de conformité) et qu'ils sont installés et utilisés comme le requiert le fabricant (voir notices d'installation et d'utilisation), aucun problème de perturbation électromagnétique ne devrait être rencontré. On peut par exemple citer des règles d'installation comme la qualité et la régularité des mises à la terre, l'usage des types de câbles conseillés (*i.e.* blindage) avec les longueurs conseillées, ...

²⁰ La flèche du haut correspond à l'**immunité** de l'équipement par rapport à son environnement, celle du bas à l'**émission** de perturbations électromagnétiques par l'équipement.

²¹ Commission Électrotechnique Internationale.

²² La norme internationale CISPR 14-2 (Compatibilité électromagnétique – Exigences relatives aux appareils électrodomestiques, outillages électriques et appareils analogues – Partie 2 : Immunité – Norme de famille de produits) ne mentionne pas la norme CEI 61000-4-8.

²³ European Telecommunications Standards Institute.

6. Réponses aux questions initiales

Suite à la réalisation de cette synthèse, chaque question est reprise et abordée individuellement. Une analyse spécifique est menée afin d'apporter une réponse aussi claire et concise que possible. Finalement, pour chacune d'elle, les éventuelles recommandations nécessaires ont été faites.

Préambule

Il est essentiel de comprendre que la réponse à ces questions et l'ensemble de cette étude considèrent la seule source de la ligne à haute tension, donc uniquement les effets directs et indirects en termes de champs électriques et magnétiques à 50 Hz.

L'étude ne porte pas sur les autres sources ou toute autre activité, présentes dans l'environnement complexe qu'est une exploitation agricole, dont les origines sont multiples et difficiles à isoler les unes des autres.

Question 1

Q1. L'exploitation d'une ligne aérienne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur la santé de l'agriculteur et/ou éleveur ?

Q2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ? Si oui, avec quelles conséquences ?

Q3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?

Q4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ? Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

Analyse

Sur base de la synthèse 5a, des recherches scientifiques sont menées depuis plus de 40 ans sur les effets potentiels des champs électromagnétiques de basse fréquence sur la santé humaine. Nombreuses de ces études ont analysé le lien potentiel entre les champs électriques et magnétiques EBF (ici 50 Hz) et la santé. Elles ne permettent pas de conclure à un lien de cause à effet entre les champs et la santé, excepté pour des effets à court terme (quelques heures/jour) à niveau de champ élevé ($> 1.000 \mu\text{T}$), comme pour les magnétosphères.

Les normes et recommandations internationales fixées à un CM de 100-200 μT et à un CE de 5.000 V/m prennent en compte l'état des connaissances en cette matière.

En dehors de la leucémie infantile, où des recommandations nettement plus faibles, de 0,4 μT , sont citées dans la littérature basée exclusivement sur des études épidémiologiques (ce qui a induit une classification 2b par le CIRC), aucun autre effet étudié (tumeur du système nerveux central chez l'enfant, cancer du sein, tumeur du système nerveux central, maladie d'Alzheimer, maladie de Parkinson, ...) dans la littérature ne permet de conclure à l'existence ou non d'un effet des champs.

Réponses

Q1. Selon la littérature consultée, la réponse à la question est non.

Q2. La littérature consultée ne permet de pas de répondre à cette question.

On parle souvent de l'effet de couronne comme un phénomène plus présent en condition humide autour des lignes aériennes (gouttes d'eau, flocons, ...). Ce phénomène de bruit est dû à un phénomène de décharges électriques partielles autour des conducteurs des lignes aériennes. Ce phénomène augmente localement le champ électrique à proximité des lignes. Celui-ci n'a a priori aucun impact sur la santé.

Q3. En l'absence d'effet des champs directement induits par les lignes électriques aériennes sur la santé, cette question n'appelle pas de réponse.

Q4. On peut reprendre ici les recommandations de l'OMS :

- Le suivi de l'évolution scientifique
- La promotion des programmes de recherche afin de réduire l'incertitude qui entoure les éléments scientifiques concernant les effets sanitaires de l'exposition aux champs EBF.
- Une communication efficace et ouverte avec toutes les parties concernées afin de prendre des décisions en connaissance de cause (comme c'est le cas sur ce dossier).

Question 2

Q1. L'exploitation d'une ligne aérienne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur la santé, le stress et le bien-être animal ?

Q2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ? Si oui, avec quelles conséquences ?

Q3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?

Q4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ? Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

Analyse pour les effets directs

S'il est globalement admis que les CM d'une intensité supérieure à 100 μT générés par les lignes électriques aériennes à haute tension ou très haute tension 50-60 Hz induisent des perturbations du fonctionnement cellulaire et animal, les effets sur la santé, le stress et le bien-être animal des CM de plus faibles intensités sont toujours discutés par la communauté scientifique particulièrement pour les valeurs inférieures à 10 μT . En outre, aucun mécanisme biologique plausible expliquant des effets induits par les champs de moins de 10 μT n'est proposé par la littérature consultée.

Les CE et CM EBF induits directement par les lignes à haute tension de 50 Hz à proximité des exploitations agricoles (*i.e.* moins de 200 m) ont été monitorés dans une seule étude française et ne dépassent pas à l'aplomb de la ligne les valeurs d'intensité de 8 μT pour le champ magnétique et 5000 V/m pour le champ électrique. L'éloignement par rapport à la ligne diminue rapidement l'intensité des champs. De plus, le CE directement induit est nettement réduit à l'intérieur des bâtiments selon ce monitoring (moins de 43 V/m) alors que l'intensité maximale du CM à l'intérieur des bâtiments reste inférieure à 3 μT .

L'exposition réelle des animaux aux CE et CM EBF générés par les lignes électriques aériennes à haute tension ou très haute tension 50-60 Hz est mal documentée, alors que ce paramètre reste crucial pour évaluer leurs effets sur les animaux. Une seule étude a réalisé un cadastre de l'exposition aux CM EBF sur des vaches dans des exploitations françaises à proximité des lignes aériennes de transport de l'électricité à haute et très haute tension, mais de manière fragmentaire (nombre d'animaux et durée des mesures). Les intensités maximales des CM EBF reçus par les animaux suivis sont compris entre 0,8 et 3 μT et en moyenne sur la journée, les animaux sont le plus souvent exposés à des CM EBF

compris entre 0 et 0,42 μ T. Par rapport aux exploitations éloignées des lignes, la cadastre démontre que les intensités des CM EBF auxquelles sont exposées les vaches sont de 4 à 10 fois supérieures dans les exploitations à proximité des lignes.

Aucun cadastre n'a été établi pour les autres animaux potentiellement présents dans les exploitations agricoles.

Aucune donnée de la littérature consultée ne permet de conclure aux potentiels effets directs sur la santé, le stress et le bien-être des animaux -qu'ils soient dans le bâtiment ou à l'extérieur du bâtiment- par les CE EBF générés directement par les lignes électriques aériennes à haute tension ou très haute tension 50-60 Hz à proximité des exploitations agricoles.

Réponse pour les effets directs

Q1. Selon la littérature consultée, la réponse à la question est non.

Q2. La littérature consultée ne permet de pas de répondre à cette question. Cet aspect est en-dehors de nos compétences.

Q3. En l'absence d'effet des champs directement induits par les lignes électriques aériennes sur ces paramètres, cette question n'appelle pas de réponse.

Q4. Les effets directs des champs magnétiques sont majoritairement étudiés en situation parfaitement contrôlée. Les points faibles de la littérature scientifiques sont :

- Peu d'études sur les animaux de ferme, dont les volailles et les porcs. Par rapport aux bovins, ces animaux ont une résistance électrique supérieure les rendant moins sensibles aux effets des CM EBF.
- Induction de CM EBF sur des périodes courtes (quelques heures par jour vs quelques jours à quelques semaines). L'exposition dans ce cas est qualifiée d'aigüe par opposition à une exposition chronique qui porte sur une grande partie de la vie de l'animal.
- Les expériences consultées n'étudient jamais les effets des CM EBF susceptibles de varier dans le temps en fonction de la quantité de courant transitant dans la ligne électrique. Cette variation du champ est susceptible de pénaliser les mécanismes d'adaptation des animaux aux perturbations induites, si faibles soient-elles.

Recommandation pour les effets directs

Afin de lever les équivoques sur les potentiels effets des CM EBF sur la santé, le stress et le bien-être des animaux de ferme, nous recommandons de pratiquer un monitoring sur une durée longue (*i.e.* plusieurs mois) de l'intensité des CM EBF induits directement par les lignes électriques aériennes haute tension et très haute tension à proximité de ces lignes.

- Pratiquer un monitoring des champs produits par les lignes à haute tension à proximité (*i.e.* moins de 200 m) des exploitations agricoles et des prairies exploitées par les animaux. Ce monitoring doit s'envisager sur un terme long (*i.e.* plusieurs mois) pour bien identifier les variations temporelles et spatiales selon les distances par rapport à la ligne ainsi que les valeurs maximales des champs magnétiques en fonction de l'exploitation des lignes. Ce travail permettra de bien définir l'exposition potentielle des animaux aux CE et CM EBF générés directement par les lignes afin de confronter ces résultats aux effets biologiques attendus mis en évidence par les expérimentations en situation contrôlée.
- Il serait aussi pertinent de pouvoir mesurer les CE et CM EBF générés par les lignes électriques aériennes haute tension et très haute tension dans les bâtiments dans lesquels séjournent les animaux et ce indépendamment des champs créés par le réseau électrique et le matériel électrique de l'exploitation agricole.

- Ce monitoring doit aussi être complété par un monitoring des animaux, pour définir leur exposition réelle aux CM en fonction de la source des champs et de leurs mouvements dans et à l'extérieur des bâtiments, sachant que leurs mouvements sont susceptibles de moduler dans le temps l'intensité des CE et CM EBF les impactant.

Question 3

Q1. L'exploitation d'une ligne aérienne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur les performances zootechniques ?

Q2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ? Si oui, avec quelles conséquences ?

Q3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?

Q4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ? Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

Analyse des effets directs

La littérature scientifique antérieure à 2015 ne démontre pas des effets directs négatifs des CE et CM EBF générés par les lignes électriques aériennes à haute tension ou très haute tension 50-60 Hz sur les performances zootechniques des animaux de ferme.

A la connaissance des auteurs, aucune étude scientifique postérieure à 2015 n'a étudié les effets directs des CE et CM EBF induits par les lignes électriques aériennes à haute tension ou très haute tension 50-60 Hz sur les performances zootechniques des animaux de ferme.

Réponse des effets directs

Q1. Selon la littérature consultée, la réponse à la question est non.

Q2. La littérature consultée ne permet de pas de répondre à cette question. Cet aspect est en-dehors de nos compétences.

Q3. En l'absence d'effet des champs directement induits par les lignes électriques aériennes sur ces paramètres, cette question n'appelle pas de réponse.

Q4. Les effets directs des CE et CM EBF sont majoritairement étudiés en situation parfaitement contrôlée. Les points faibles de la littérature scientifique sont :

- Peu d'études sur les animaux de ferme en situation contrôlée.
- Induction de CM EBF sur des périodes courtes (quelques heures par jour vs quelques jours à quelques semaines). L'exposition dans ce cas est qualifiée d'aigüe par opposition à une exposition chronique qui porte sur une grande partie de la vie de l'animal.
- Les expériences consultées n'étudient jamais les effets des CM EBF susceptibles de varier dans le temps en fonction de la quantité de courant transitant dans la ligne électrique. Cette variation du champ est susceptible de pénaliser les mécanismes d'adaptation des animaux aux perturbations induites, si faibles soient-elles.

La réponse est également non pour les effets indirects des CM à l'étable si et seulement si l'installation électrique des bâtiments est totalement conforme, de manière à pouvoir annuler les effets des courants parasites induits par ces CM sur les différentes structures métalliques que l'on peut y retrouver : charpentes, cornadis, salle de traite, conduites d'eau, abreuvoirs, mangeoires, clôtures électriques etc. Concrètement, cela signifie :

- Mise à la terre efficace des installations.
- Résistance de la prise de terre $\leq 18 \Omega$.
- Liaisons équipotentielles $\leq 0,2 \Omega$.

Par contre, la réponse est oui pour les effets indirects des CM à l'étable si l'installation électrique est non conforme ou si elle a été modifiée ou dégradée avec le temps.

La réponse est aussi oui si le fonctionnement de la LHT génère des courants vagabonds qui entrent dans l'exploitation par sa ligne de terre ou si le courant fourni à l'exploitation est pollué par des courants de hautes fréquences (transitoires et harmoniques), de diverses provenances potentielles : industries raccordées à la LHT après transformation du courant, fibres optiques enroulées autour des câbles de la LHT, antennes relais de téléphonie mobile (4G et/ou 5G) placées sur les pylônes de la LHT ou dans son environnement proche... Les bandes de fréquence prévues pour la 5G se situent entre 700 MHz et 26 GHz alors que, pour la 4G, elles sont entre 700 et 2.600 MHz.

Les symptômes suivants pourraient alors être observés qui devraient être considérés comme autant de signaux d'alerte potentiels :

- Modifications du comportement : augmentation du temps de traite, vidange incomplète des pis, nervosité extrême dans la salle de traite, aversion pour entrer dans la salle de traite, sortie rapide de la salle de traite, réticence à utiliser les abreuvoirs ou les mangeoires métalliques, comportement de buvée modifié (vaches qui lapent l'eau dans l'abreuvoir), piétinement incessant, battements de queue intempestifs, coups de pied donnés aux trayeurs.
- Performances de production : périodes intermittentes de baisse de production laitière, production laitière insuffisante de façon inexpliquée, chute soudaine et significative de la production laitière.
- Troubles de la santé : tremblements, poils hérissés, augmentation de l'incidence des mammites cliniques, taux cellulaires élevés (mammites subcliniques), jarrets gonflés, lésions des onglons qui ne répondent pas aux traitements antibiotiques, avortements, veaux mort-nés, boiteries, mortalité de plus d'un animal sur une courte période.

Recommandation pour les effets directs

Afin de lever les équivoques sur les potentiels effets des CM EBF sur les performances zootechniques des animaux de ferme, nous recommandons de pratiquer un monitoring sur une durée longue (*i.e.* plusieurs mois) de l'intensité des CM EBF induits directement par les lignes électriques aériennes haute tension et très haute tension à proximité de ces lignes.

- Pratiquer un monitoring des champs produits par les lignes à haute tension à proximité (*i.e.* moins de 200 m) des exploitations agricoles et des prairies exploitées par les animaux. Ce monitoring doit s'envisager sur un terme long (*i.e.* plusieurs mois) pour bien identifier les variations temporelles et spatiales selon les distances par rapport à la ligne ainsi que les valeurs maximales des champs magnétiques en fonction de l'exploitation des lignes. Ce travail permettra de bien définir l'exposition potentielle des animaux aux CE et CM EBF générés directement par les lignes afin de confronter ces résultats aux effets biologiques attendus mis en évidence par les expérimentations en situation contrôlée.
- Il serait aussi pertinent de pouvoir mesurer les CE et CM EBF générés par les lignes électriques aériennes haute tension et très haute tension dans les bâtiments dans lesquels séjournent les animaux et ce indépendamment des champs créés par le réseau électrique et le matériel électrique de l'exploitation agricole.
- Ce monitoring doit aussi être complété par un monitoring des animaux, pour définir leur exposition réelle aux CM en fonction de la source des champs et de leurs mouvements dans et à l'extérieur des bâtiments, sachant que leurs mouvements sont susceptibles de moduler dans le temps l'intensité des CE et CM EBF les impactant.

Afin d'éviter toute polémique dans les cas où de tels problèmes, absents jusque-là, surviendraient dans des exploitations, que celles-ci disposent d'une installation électrique conforme ou pas, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- 1) Réalisation d'un audit, avant la construction de la LHT, reprenant la situation sanitaire, le comportement des animaux et leurs performances zootechniques dans toutes les exploitations situées à moins de 250 mètres de part et d'autre de l'axe de la LHT.
- 2) Proposer à ces exploitations un diagnostic électrique préalable, de préférence par temps humide, concernant l'ensemble des bâtiments de ferme ainsi que la maison d'habitation.
- 3) Le cas échéant, mettre aux normes l'installation électrique de ces exploitations.
- 4) Sélectionner parmi celles-ci une exploitation complètement raccordée à la terre comme ferme témoin.
- 4) Pour ces mêmes exploitations, répéter, à la fin de la première année d'exploitation de la LHT, l'audit comportemental, sanitaire et zootechnique, de même que le diagnostic électrique.
- 5) Dans la ferme témoin, réaliser un monitoring en continu de l'exposition des animaux aux CEM intérieurs et extérieurs, des tensions de pas et de contact, au moins dans la stabulation et la salle de traite. Pour mesurer les tensions, un oscilloscope est à utiliser plutôt qu'un voltmètre digital afin de déterminer la tension de crête (plus significative que la tension moyenne). Il convient aussi d'y mesurer les harmoniques (oscilloscope et analyseur numérique). Cette dernière recommandation serait assez originale et permettrait de s'assurer de la qualité du courant fourni.

Question 4

- Q1. L'exploitation d'une ligne aérienne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur la quantité et la qualité des productions et végétales ?
- Q2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ? Si oui, avec quelles conséquences ?
- Q3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?
- Q4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ? Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

Analyse pour les effets directs

Chez les plantes, les CM EBF de quelques μT sont susceptibles de modifier des paramètres biologiques sans pour autant avoir des effets démontrés sur la production végétale pour ces aspects quantitatifs. Quelques études de terrain portent sur un terme long (*i.e.* la durée de la culture du végétal) et prennent très certainement en considération les intermittences des CM EBF en fonction de la quantité de courant transitant dans la ligne électrique.

Une étude sur 5 années montrait que le rendement d'une des 2 plantes testées était négativement impacté (moins 7 % de production pour le blé d'hiver) à proximité de la ligne (à 2 mètres de la ligne versus 8, 12 et 40 m). A 2 m de la ligne, les intensités des champs étaient de 4 kV/m pour le CE et 3 μT pour le CM.

Les aspects qualitatifs des productions végétales n'ont jamais fait l'objet d'expérimentation à notre connaissance.

Réponse pour les effets directs

- Q1. Selon la littérature consultée, la réponse à la question est non.
- Q2. La littérature consultée ne permet pas de répondre à cette question. Cet aspect est en-dehors de nos compétences.
- Q3. En l'absence d'effet des champs directement induits par les lignes électriques aériennes sur la quantité et la qualité des productions et végétales, cette question n'appelle pas de réponse.
- Q4. Seules 2 plantes de grandes cultures (*i.e.* le maïs et le blé) ont fait l'objet d'une expérimentation en milieu semi-contrôlé et le rendement d'une des 2 plantes est impacté négativement (moins 7 % pour le blé) à une distance de 2 m par rapport à la ligne. D'autres plantes de grande culture devraient faire l'objet de ce type d'expérimentation.

Recommandation pour les effets directs

Le monitoring proposé dans le cadre des effets sur les animaux permettra d'objectiver les intensités des CE et CM EBF en fonction de la distance par rapport à la ligne et leur variation temporelle en fonction de la quantité de courant transitant dans la ligne électrique.

Des essais en champs de plantes de grande culture devraient être conduits afin d'étudier les effets des CE et CM EBF induits par les lignes aériennes à haute tension sur les rendements des cultures et la qualité des produits issus de ces cultures. Il faut garder cependant à l'esprit que tous les autres facteurs, dont les conditions pédologiques et les autres perturbations électromagnétiques, pouvant influencer les paramètres de réponse doivent être parfaitement maîtrisés. Ce type d'étude doit par ailleurs être répété sur plusieurs années pour minimiser l'effet de l'année sur les paramètres étudiés.

Question 5

Q1. L'exploitation d'une ligne aérienne à haute tension (380 kV, capacité de 6 GW) peut-elle avoir un impact sur l'utilisation d'instruments présents dans les exploitations (GPS, drones, tracteurs, robots de traites, abreuvoirs, instruments mécaniques ou électroniques, etc.) ?

Q2. Les conditions climatiques et/ou météorologiques peuvent-elles influencer ces impacts ? Si oui, avec quelles conséquences ?

Q3. Pour les effets mis en évidence, quelles sont les mesures permettant d'éviter ou de réduire ces effets et leurs conséquences ?

Q4. La littérature scientifique permet-elle d'apporter des réponses claires à ces questions ? Si non, que conviendrait-il de mettre en place ?

Analyse

Sur base du paragraphes 5.e, si les équipements électroniques au sens large utilisés dans les exploitations agricoles sont bien conformes à la législation en vigueur (en Europe, marquage CE et déclaration de conformité) et qu'ils sont installés et utilisés comme le requiert le fabricant (voir notices d'installation et d'utilisation), aucun problème de perturbation électromagnétique ne devrait être rencontré. On peut par exemple citer des règles d'installation comme la qualité et la régularité des mises à la terre, l'usage des types de câbles conseillés (*i.e.* blindage) avec les longueurs conseillées, ... Nous avons également insisté sur les règles pour une « bonne » installation électrique au paragraphe 5.d.

Réponse

Q1. Selon la législation consultée et si les règles énoncées ci-dessus sont respectées, la réponse à la question est non.

Q2. La littérature consultée ne permet pas de répondre à cette question.

Il est essentiel que la mise en conformité des installations électriques soit pérenne dans le temps et/ou contrôlée périodiquement.

En effet, dans les exploitations agricoles, certains phénomènes peuvent avoir des impacts, comme les intempéries, l'humidité, les poussières, la corrosion, ... tout ceci accélère le vieillissement et la dégradation des diverses structures métalliques (exemples : cornadis, abreuvoirs, clôtures) et diminue la qualité des mises à la terre, des contacts, des raccordements, ...

Q3. Il est essentiel d'avoir :

- Des installations électriques conformes ou une mise en conformité des installations électriques.
- Si des structures métalliques sont longues (plus de 10 m), des mises à la terre régulières sont nécessaires (tous les 10 m).
- Du matériel conforme à la législation européenne.

Q4. Il y a peu ou pas de littérature spécifique sur le sujet, à notre connaissance.

7. Références et bibliographie

7.1 Références et bibliographie – Partie 5.a

1. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics 74 (4): 494-522; 1998.
2. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz). Health Physics 99(6):818-836; 2010.
3. Recommandation du Conseil de l'Union européenne du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz), publiée au Journal Officiel des Communautés Européennes du 30 juillet 1999 (1999/519/CE).
4. OMS - Aide-mémoire N° 322 daté de Juin 2007 - Champs électromagnétiques et santé publique - Exposition aux champs de fréquence extrêmement basse.
5. OMS - Extremely low frequency fields. Critères d'hygiène de l'environnement, Vol. 238. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 2007.
6. Report on risk analysis of human exposure to electromagnetic fields (revised version), European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (EFHRAN, 2012).
7. Report on risk analysis of human exposure to electromagnetic fields, European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (EFHRAN, 2010).
8. Report on the analysis of risks associated to exposure of EMF: in vitro and in vivo (animals) studies, European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (EFHRAN, 2010).
9. Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), European Commission – Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR, 2015).
10. ANSES, Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences, Avis de l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire - Alimentation, Environnement, Travail), Rapport d'expertise collective, 2019.

7.2 Références et bibliographie – Partie 5.b

11. ANSES, 2015. Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Août 2015, 169 p. Disponible à <https://www.anses.fr/fr/system/files/SANT2013sa0037Ra.pdf>
12. MALKEMPER E. P., TSCHULIN Th., VANBERGEN A. J., VIAN A., BALIAN E., GOUDESEUNE L., 2018. The impacts of artificial Electromagnetic Radiation on wildlife (flora and fauna). Current knowledge overview: a background document to the web conference. A report of the EKLIPSE project, 32 p. Disponible à http://www.eclipse-mechanism.eu/documents/15803/0/EMR-KnowledgeOverviewReport_FINAL_27042018.pdf/1326791c-f39f-453c-8115-0d1c9d0ec942

13. GOUDESEUNE L., BALIAN E., VENTOCILLA J., 2018. The impacts of artificial Electromagnetic Radiation on wildlife (flora and fauna). Report of the web conference. A report of the EKLIPSE project; 32 p. Disponible à http://www.eklipse-mechanism.eu/documents/15803/0/EMR-KnowledgeOverviewReport_FINAL_27042018.pdf/1326791c-f39f-453c-8115-0d1c9d0ec94
14. Biasotto, L.D., Kindel, A., 2018. Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review. *Environmental Impact Assessment Review*, 71, pp. 110-119. Cited 5 times.
15. Adair, R., 2000. Static and low-frequency magnetic field effects: Health risks and therapies. *Reports on Progress in Physics*, 63, 415–454. Cited 34 times.
16. Belova, N.A., Ermakova, O.N., Ermakov, A.M., Rojdestvenskaya, Z.Ye., Lednev, V.V., 2007. The bioeffects of extremely weak power-frequency alternating magnetic fields. *Environmentalist*, 27 (4), pp. 411-416. Cited 29 times.
17. Belova, N.A., Acosta-Avalos, D., 2015 The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*, art. no. 423838. Cited 2 times.
18. Wang, H., Zhang, X., 2017. Magnetic fields and reactive oxygen species. *International Journal of Molecular Sciences*, 18 (10), art. no. 2175. Cited 37 times.
19. Lai, H., 2019. Exposure to Static and Extremely-Low Frequency Electromagnetic Fields and Cellular Free Radicals. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 38 (4), pp. 231-248. Cited 0 time.
20. Hore P.J., 2019. Upper bound on the biological effects of 50/60 Hz magnetic fields mediated by radical pairs. *eLife*, 8:e44179. Cited 0 time.
21. Vanderstraeten J., 2017. Champs magnétiques et santé : de l'épidémiologie à la chimie des cryptochromes. *Rev. Med. Brux.*, 38, 79-89. Cited 3 times.
22. Lundberg, L., Sienkiewicz, Z., Anthony, D.C., Broom, K.A., 2019. Effects of 50 Hz magnetic fields on circadian rhythm control in mice. *Bioelectromagnetics*, 40 (4), pp. 250-259. Cited 0 time.
23. Kolbabová, T., Malkemper, E.P., Bartoš, L., Vanderstraeten, J., Turčáni, M., Burda, H., 2015. Effect of exposure to extremely low frequency magnetic fields on melatonin levels in calves is seasonally dependent. *Scientific Reports*, 5, art. no. 14206. Cited 3 times.
24. Laszlo, A.M., Ladanyi, M., Boda, K., Csicsman, J., Bari, F., Serester, A., Molnar, Z., Sepp, K., Galfi, M., Radacs, M., 2018. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on turkeys. *Poultry Science*, 97 (2), pp. 634-642. Cited 1 time.
25. Ruan, G., Liu, X., Zhang, Y., Wan, B., Zhang, J., Lai, J., He, M., Chen, C., 2019. Power-frequency magnetic fields at 50 Hz do not affect fertility and development in rats and mice. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 38 (1), pp. 111-122. Cited 2 times.
26. Pietruszewski, S., Martínez, E., 2015. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: A review. *International Agrophysics*, 29 (3), pp. 377-389. Cited 17 times.

27. Radhakrishnan, R., 2019. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25 (5), pp. 1107-1119. Cited 0 time.
28. Teixeira da Silva, J.A., Dobránszki, J., 2016. Magnetic fields: how is plant growth and development impacted? *Protoplasma*, 253 (2), pp. 231-248. Cited 26 times.
29. Soja, G., Kunsch, B., Gerzabek, M., Reichenauer, T., Soja, A.-M., Rippar, G., Bolhàr-Nordenkamp, H.R., 2003. Growth and Yield of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) and Corn (*Zea mays* L.) Near a High Voltage Transmission Line. *Bioelectromagnetics*, 24 (2), pp. 91-102. Cited 22 times.
30. Mahmood, M., Bee, O.B., Mohamed, M.T.M., Subramaniam, S., 2013. Effects of electromagnetic field on the nitrogen, protein and chlorophyll content and peroxidase enzyme activity in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) leaves. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 25 (6), pp. 471-482. Cited 3 times.
31. Aksoy, H., Unal, F., Ozcan, S., 2010. Genotoxic effects of electromagnetic fields from high voltage power lines on some plants. *International Journal of Environmental Research*, 4 (4), pp. 595-606. Cited 10 times.
32. Dannehl, D., 2018. Effects of electricity on plant responses. *Scientia Horticulturae*, 234, pp. 382-392. Cited 3 times.

7.3 Références et bibliographie – Partie 5.c

33. Aneshansley D.J., Gorewit R.C. Sensitivity of Holsteins to 60 Hz and other waveforms present on dairy farms. 1999, ASAE/CSAE-SCGR International Meeting, paper N° 993152, 2950 Niles Rd., St Joseph, MI, USA.
34. ANSES (collectif). Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques. Août 2015.
35. Appleman R.D., Gustafson R.J. Source of stray voltage and effect on cow health and performance. *J. Dai. Sci.*, 1985, 68 : 1554-1567.
36. Burchard J.F., Nguyen D.H. Biological effects of electric and magnetic fields on productivity of dairy cows. *J. Dai. Sci.*, 1996, 79 : 1549-1554.
37. Erdreich L.S., Alexander D.D., Wagner M.E., Reinemann D. Meta-analysis of stray voltage on dairy cattle. *J. Dai. Sci.*, 2009, 92 : 5951-5963.
38. Hillman D., Stetzer D., Graham M., Goeke C.L., Mathson K.E., VanHorn H.H., Wilcox C.J. Relationship of electric power quality to milk production of dairy herds – Field study with literature review. *Science of the Total Environment*, 2013, 447 : 500-514.
39. Hultgren J. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. II. Physiological effects and the concept of stress. *Vet. Com.*, 1990, 14 : 299-308.
40. Norell R.J., Gustafson R.J., Appleman R.D., Overmier J.B. Behavioral studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1983, 26 : 1506-1511.

41. Reilly J.P. Electrical stimulation and electropathology. 1992, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 524.
42. Reinemann D.J. Stray voltage and milk quality. A review. Vet. Clin. North Am., Food Anim., 2012, 28 : 321-345.
43. Rigalma K., Duvaux-Ponter C., Oliveira A., Martin O., Louyot T., Deschamps F., Roussel S. Determination of a stray voltage threshold in Holstein heifers, influence of predictability and past experience on behavioural and physiological responses. Animal Welfare, 2011, 20 : 385-395.
44. Sheppard A.R., Eisenbud M. Biological effects of electric and magnetic fields of extremely low frequency. 1977, New York University Press, New York.
45. Stetzer D., Leavitt A.M., Goeke C.L., Havas M. Monitoring and remediation of on-farm and off-farm ground current measured as step potential on a Wisconsin dairy farm: a case study. Electromagnetic Biology and Medicine, 2016, 35 : 321-336.

Remarque : certaines références sont reprises directement en notes de bas de page dans le corps du document.

Sites internet

BBEMG (Belgian BioElectroMagnetics Group) - <https://www.bbemg.uliege.be>

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) - <http://www.who.int/fr/> et plus particulièrement http://www.who.int/topics/electromagnetic_fields/fr/

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) - <http://www.icnirp.de/>

CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) - <http://www.iarc.fr/indexfr.php>

GPSE (Groupement Permanent pour la Sécurité Électrique en milieu agricole) – www.gpse.fr

Glossaire

ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire
CE	Champ Électrique
CIRC	Centre international de Recherche sur le Cancer
CM	Champ Magnétique
EBF	Extrêmement Basse Fréquence
EFHRAN	European Health Risk of Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure
ELF	Extremely Low Frequency
FWA	Fédération Wallonne de l'Agriculture
GPSE ²⁴	Groupe Permanent pour la Sécurité Électrique en milieu agricole
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers

²⁴ Courants électriques parasites en élevage – Connaître et maîtriser, GPSE, 2019.

LHT Ligne à Haute Tension
OMS Organisation Mondiale de la Santé
SCENHIR Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks