



HAL
open science

Contribution à l'étude des effets des champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence sur la qualité du lait des bovins

Victor Ravenel

► **To cite this version:**

Victor Ravenel. Contribution à l'étude des effets des champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence sur la qualité du lait des bovins. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04612133

HAL Id: dumas-04612133

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04612133>

Submitted on 14 Jun 2024

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

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

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 007

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES EFFETS DES CHAMPS
ELECTROMAGNETIQUES EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE SUR
LA QUALITE DU LAIT DES BOVINS**

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 24 mai 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

RAVENEL Victor

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 007

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES EFFETS DES CHAMPS
ELECTROMAGNETIQUES EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE SUR
LA QUALITE DU LAIT DES BOVINS**

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 24 mai 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

RAVENEL Victor

Liste des enseignants (au 13/03/2024)

Mme	ABITBOL	Marie	Professeur
M.	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Mme	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Mme	BECKER	Claire	Professeur
Mme	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	Professeur
M.	BERNY	Philippe	Professeur
Mme	BLONDEL	Margaux	Maitre de conférences
M.	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
M.	BRUTO	Maxime	Maître de conférences
M.	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
M.	BUFF	Samuel	Professeur
M.	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
M.	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
M.	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
M.	CHABANNE	Luc	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
M.	CHANOIT	Guillaume	Professeur
M.	CHETOT	Thomas	Maître de conférences
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Mme	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Mme	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
M.	GALIA	Wessam	Maître de conférences
M.	GILLET	Benoit	Maître de conférences
Mme	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Mme	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Mme	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
M.	JUNOT	Stéphane	Professeur
M.	KODJO	Angeli	Professeur
Mme	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Mme	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	Professeur
Mme	LEBLOND	Agnès	Professeur
Mme	LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
M.	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
M.	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	Professeur
M.	LURIER	Thibaut	Maître de conférences
M.	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
M.	MARCHAL	Thierry	Professeur
Mme	MOSCA	Marion	Maître de conférences

M.	MOUNIER	Luc	Professeur
Mme	PEROZ	Carole	Maître de conférences
M.	PIN	Didier	Professeur
Mme	PONCE	Frédérique	Professeur
Mme	PORTIER	Karine	Professeur
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
Mme	PROUILLAC	Caroline	Professeur
M.	RACHED	Antoine	Maître de conférences
Mme	REMY	Denise	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
M.	ROGER	Thierry	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Michael	Professeur
Mme	SERGENTET	Delphine	Professeur
M.	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Mme	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
M.	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

À Monsieur le Professeur Yves BERTHEZENE,

De l'Université Claude Bernard Lyon 1, Faculté de Médecine de Lyon

Pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Veillez trouver ici l'expression de mes hommages respectueux.

À Monsieur le Professeur Luc MOUNIER,

De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon

Pour votre gentillesse, votre intérêt et votre réactivité.

Cela a été un réel plaisir et un honneur de travailler avec vous.

Veillez trouver ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

À Madame la Docteure Dorothée LEDOUX,

De VetAgro Sup, Campus vétérinaire de Lyon

Pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse.

Veillez trouver ici l'expression de mon plus sincère respect.

À Monsieur le Docteur Hubert VIN,

Du Groupe Vétérinaire Néocastrien,

Pour m'avoir fait confiance pour mes débuts, et confié la réalisation de ce travail.

Veillez trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	11
LISTE DES ABREVIATIONS.....	13
INTRODUCTION	15
PREMIERE PARTIE : INFLUENCE DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES SUR LES ANIMAUX DE RENTE.....	17
I. Physique des ondes électromagnétiques.....	17
1. Champs électromagnétiques.....	17
a. Champ électrique.....	17
b. Champ magnétique.....	17
c. Champs électromagnétiques naturels.....	18
d. Champs électromagnétiques alternatifs.....	18
2. Classification physique des ondes électromagnétiques.....	20
a. Energie d'une onde électromagnétique.....	20
b. Rayonnements ionisants.....	20
c. Rayonnements non ionisants.....	20
d. Induction électromagnétique.....	21
e. Sources des champs électromagnétiques alternatifs 50 Hz.....	22
II. Effets connus des champs électromagnétiques sur les êtres vivants.....	24
1. Chez l'Homme.....	24
a. Effets cancérogènes.....	24
b. Effets sur le système nerveux central.....	24
c. Intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM).....	25
d. Normes d'exposition aux CEM.....	25
2. Etudes <i>in vitro</i>	26
3. Etudes sur les rongeurs.....	26
4. Effets sur les animaux d'élevage.....	28
a. Etudes en conditions réelles.....	28
b. Etudes en milieu contrôlé.....	30

DEUXIEME PARTIE : LIEN ENTRE CHAMP MAGNETIQUE MESURE DANS LE ROBOT DE TRAITE ET TAUX CELLULAIRE DE TROUPEAU	35
I. Pré-étude : variations de champ magnétique au cours de la journée.....	35
1. Objectifs.....	35
2. Matériels.	35
3. Méthode.....	36
4. Résultats.....	37
5. Conclusion.....	39
II. Etude : Mise en évidence d'une corrélation entre champ magnétique de robot de traite et comptage cellulaire de troupeau.....	39
1. Objectif.....	39
2. Matériels et méthodes.	39
a. Elevages inclus dans l'étude.	39
b. Mesure du champ magnétique.	40
c. Comptage cellulaire de troupeau.....	40
3. Méthode de mesure du champ électromagnétique.....	41
4. Résultats.....	42
a. Répartition des valeurs de taux cellulaires.	42
b. Champ magnétique ambiant et champ magnétique dans les robots.	43
c. Variabilité entre les modèles de robots.....	44
d. Comparaison des taux cellulaires en fonction du champ magnétique.	45
5. Conclusions.	46
6. Limites.	47
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE	51

Liste des figures

Figure 1 : Propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace. L'onde bleue représente le champ électrique, et l'onde jaune représente le champ magnétique. On définit alors λ , la longueur d'onde de l'onde électromagnétique en résultant. (Roussel, 2023)	19
Figure 2 : Génération de courants induits au voisinage de champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence (CEM-EBF) ; (d'après Rigalma <i>et al.</i> , 2009).....	22
Figure 3 : En haut : Schéma de la chambre d'exposition de l'université McGill (Nguyen, 2005). En bas : Photographie de l'intérieur de la chambre d'exposition de l'université McGill (Hydro-Québec, 2023)	31
Figure 4 : L'appareil de mesure du champ magnétique utilisé dans cette étude (LATNEX, 2023)	35
Figure 5 : Méthode de mesure du champ magnétique dans le robot.....	36
Figure 6 : Champ magnétique mesuré dans le robot en fonction de l'heure.....	37
Figure 7 : Champ magnétique mesuré dans le robot et consommation électrique française (RTE, 2023) en fonction de l'heure	38
Figure 8 : Répartition des modèles de robots rencontrés dans l'étude	40
Figure 9 : Diagramme de répartition des taux cellulaires de troupeau de l'étude	42
Figure 10 : Diagrammes de répartition des champs magnétiques mesurés en fonction du lieu de mesure.....	43
Figure 11 : Diagrammes de répartition des champs magnétiques mesurés en fonction du modèle de robot de traite	44
Figure 12 : Diagrammes de répartition des taux cellulaires de troupeau en fonction du groupe (1: CEM < 0,022 μ T; 2: CEM > 0,022 μ T).....	45

Liste des tableaux

Tableau I : Quelques exemples de valeurs de champs magnétiques et électriques au quotidien ; la valeur entre parenthèses est la distance entre la source et l'appareil de mesure (ANSES, 2015).....	23
---	----

Liste des abréviations

A : ampère

ADN : acide désoxyribonucléique

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail

c : célérité

CEM-EBF : champ électromagnétique extrêmement basse fréquence

E : énergie

f : fréquence

h : constante de Planck

(T)HT : (très) haute tension

Hz : Hertz

IGF-1: insulin-like growth factor-1

J : Joule

λ : longueur d'onde

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Ω : ohm

R : résistance

t : temps

T : Tesla

V: volt

INTRODUCTION

Au sein du monde agricole, les potentiels effets des champs électromagnétiques sur le bétail sont source de nombreuses inquiétudes ; en témoigne l'abondance d'articles à ce sujet dans la presse spécialisée. Il faut dire que ces effets ne sont toujours pas parfaitement déterminés. A ce sujet, un rapport d'experts de l'ANSES de 2021 (ANSES, 2021) concluait :

« Pour les installations électriques en élevage, il faudrait élaborer et valider des protocoles rigoureux permettant de les évaluer, au-delà de l'objectif de vérification de la conformité réglementaire, via notamment la recherche des champs électromagnétiques [...] avec des outils de mesure adaptés et performants. »

En particulier, si des études ont prouvé que l'exposition à court terme à des champs électromagnétiques de forte intensité n'avait que de faibles conséquences sur la santé, rares sont celles qui évaluent les conséquences d'une exposition à plus long terme, à des intensités rencontrées plus couramment.

Dans cette thèse, nous allons essayer de répondre à une partie de la question de l'impact des champs électromagnétiques sur la santé et la production des bêtes qui y sont exposées.

Nous proposons ainsi d'expliquer tout d'abord les paramètres physiques qui régissent les champs électromagnétiques. Nous décrivons ensuite les effets des champs sur les êtres vivants, et plus particulièrement les animaux de production, au travers d'une étude bibliographique. Enfin, grâce à une étude de terrain, nous tenterons de mettre en évidence une incidence de l'exposition à un champ électromagnétique sur la qualité du lait.

PREMIERE PARTIE : INFLUENCE DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES SUR LES ANIMAUX DE RENTE

I. Physique des ondes électromagnétiques.

L'objectif de cette partie est de définir les principes physiques qui régissent les ondes électromagnétiques. Cette partie s'appuie en grande partie sur un cours d'électromagnétisme (Roussel, 2023).

1. Champs électromagnétiques.

Les champs électromagnétiques sont eux-mêmes composés de deux types de champs : les champs électriques et les champs magnétiques.

a. Champ électrique.

Lorsqu'une particule est chargée électriquement, elle est entourée d'un champ de forces électriques qui s'exerce sur l'ensemble des particules chargées autour d'elle. La somme des champs de forces électriques dans un espace donné est appelée **champ électrique**. Si on place un objet chargé électriquement dans ce champ, les forces qui s'exercent sur l'objet le mettent alors en mouvement dans une direction : le sens de propagation du champ électrique est parallèle à cette direction.

Le champ électrique généré par un corps est proportionnel à la tension (en V) entre ce corps et l'environnement qui l'entoure, et inversement proportionnel à la distance qui sépare le corps du point de mesure (en m). On l'exprime en Volt par mètre (V/m).

Les champs électriques sont facilement arrêtés par la matière, en particulier les matériaux non conducteurs.

b. Champ magnétique.

Lorsque des charges électriques se déplacent dans un conducteur (objet qui conduit l'électricité, par exemple un fil électrique), elles sont à l'origine d'un nouveau champ de force, perpendiculairement à leur direction de déplacement : le **champ magnétique**.

La densité de ce champ magnétique, appelée induction magnétique, s'exprime en Tesla (T) dans le système international, ou plus anciennement en Gauss (G).

Le champ magnétique est traditionnellement représenté par des boucles continues entourant le trajet des charges électriques qui le créent.

L'induction d'un champ magnétique est proportionnelle à l'intensité électrique (en A) du courant qui en est à l'origine, et inversement proportionnelle au **carré de la distance** qui sépare la source du point de mesure (en m²).

A la différence des champs électriques, les champs magnétiques ne sont généralement pas arrêtés par la matière.

Les champs magnétiques et électriques créés par un même courant électrique sont perpendiculaires entre eux dans l'espace. La combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique forme alors un **champ électromagnétique (CEM)**.

c. Champs électromagnétiques naturels.

Il existe des champs électromagnétiques artificiels ou naturels, suivant que leur source soit ou non créée par l'Homme.

La valeur habituelle du champ électrique atmosphérique est comprise entre 100 et 200 V/m ; elle peut aller jusqu'à dépasser les 10 kV/m, par exemple lors d'orages.

La valeur habituelle du champ magnétique terrestre, généré par le noyau terrestre, varie entre 35 et 70 μ T selon la latitude (environ 50 μ T en France).

d. Champs électromagnétiques alternatifs.

Lorsqu'un courant électrique varie à une certaine fréquence (c'est le cas avec un courant alternatif), le champ électromagnétique en résultant varie selon la même fréquence.

Ces variations de champ électromagnétique peuvent être vues comme des ondes (ondes électromagnétiques, voir sur la figure 1) : on leur affecte alors une **fréquence** f en Hertz (Hz), une longueur d'onde λ en mètres (m) ainsi qu'une vitesse c en mètres par seconde (m/s).

Fréquence, longueur d'onde et vitesse sont liées par la formule : $\lambda = c / f$, avec $c = 3 \times 10^8$ m/s. D'après cette formule, les ondes électromagnétiques de fréquence élevée sont de faible longueur d'onde, donc un grand nombre de longueurs d'onde sépare rapidement la source du récepteur. Dans ce cas, les champs électrique et magnétique sont fortement liés, et on peut chiffrer l'énergie globale véhiculée par l'onde électromagnétique qui en résulte, en Watts par mètre carré (W/m^2).

Au contraire, à basse fréquence, la longueur d'onde est très grande : à titre d'exemple, pour 50 Hz (fréquence sur le réseau électrique français), la longueur d'onde est de l'ordre de 6000 km. Les effets des champs magnétiques et électriques sont alors indépendants.

En outre, dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons aux conséquences du champ magnétique généré par le courant du réseau électrique : or si la fréquence et la tension de celui-ci sont constantes (respectivement 50 Hz et 230 V pour du monophasé), l'intensité peut, quant à elle, varier fortement suivant la demande des consommateurs, générant ainsi des variations de l'intensité du champ magnétique sans variation associée du champ électrique.

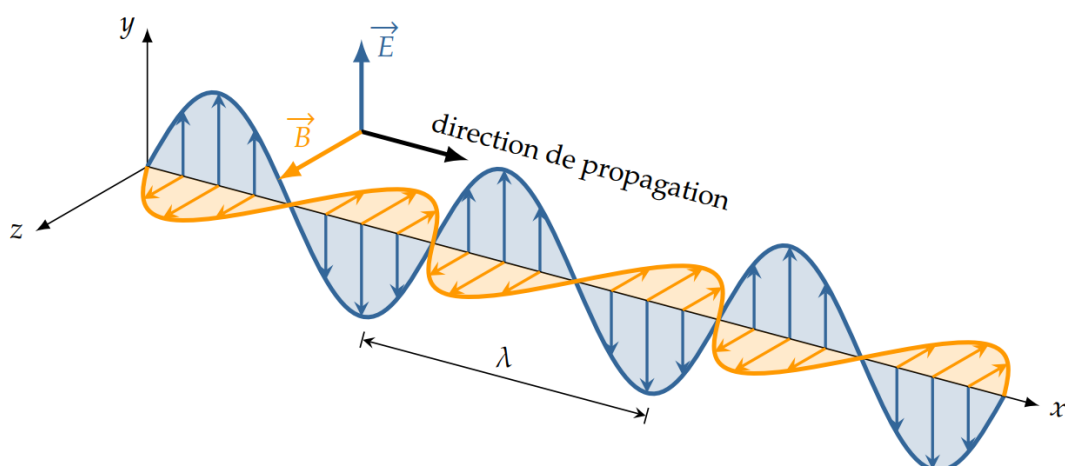


Figure 1 : Propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace. L'onde bleue représente le champ électrique, et l'onde jaune représente le champ magnétique. On définit alors λ , la longueur d'onde de l'onde électromagnétique en résultant. (Roussel, 2023)

A la fréquence 50 Hz, le champ magnétique terrestre (environ 10^{-12} T), ainsi que le champ électrique atmosphérique (de l'ordre du mV/m) sont de faibles ordres de grandeur comparés aux CEM artificiels. Ainsi, en général, lorsque l'on étudie les CEM générés par des courants alternatifs à la fréquence 50 Hz, on néglige les CEM naturels.

2. Classification physique des ondes électromagnétiques.

a. Energie d'une onde électromagnétique.

L'énergie transportée par une onde électromagnétique est régie par la formule de Planck : $E = h \times f$, où E est l'énergie en électron-Volt (eV, homogène à des Joules), h la constante de Planck en électron-Volt par seconde ($h = 4,135 \times 10^{-15}$ eV/s) et f la fréquence en Hertz (Hz).

Ainsi, plus la fréquence d'une onde électromagnétique est élevée, plus l'énergie qu'elle transporte est élevée. Si l'onde transporte une énergie suffisamment élevée pour rompre l'attraction d'un électron par son atome, alors elle est capable de transformer ce dernier en ion : on distingue ainsi rayonnements ionisants et non ionisants.

b. Rayonnements ionisants.

L'énergie des rayonnements ionisants est suffisamment élevée pour permettre la rupture de la liaison électron-atome ; leur fréquence est supérieure à 10^{16} Hz.

Il s'agit des rayonnements ayant une longueur d'onde plus faible que le spectre du visible : les ultraviolets, les rayons X, les rayons gamma. Etant capables de modification à l'échelle atomique, ils sont dangereux pour le vivant : ils peuvent entre autres causer des altérations du génome, qui peuvent elles-mêmes être à l'origine de cancers.

c. Rayonnements non ionisants.

Les **rayonnements non ionisants**, quant à eux, ne sont pas capables de modifier la structure des molécules biologiques.

On distingue, suivant leur origine et leur fréquence : les infrarouges, les micro-ondes, les ondes radio, les Très Basses Fréquences (TBF ou VLF pour *Very Low Frequency* en anglais) et enfin les Extrêmement Basses Fréquences (EBF ou ELF pour *Extremely Low Frequency*).

Les ondes EBF ont une fréquence comprise entre 0 et 1000 Hz. Elles comprennent notamment les champs électromagnétiques générés par le 50 Hz, qui ont d'après la formule de Planck une **énergie très faible**, de l'ordre de 10^{-13} eV. C'est à ce type de champs électromagnétiques que nous allons nous intéresser.

d. Induction électromagnétique.

Comme nous l'avons vu, le rayonnement électromagnétique véhicule une énergie, à l'origine d'effets directs sur les objets qu'il rencontre.

Cependant, un CEM peut également créer des effets indirects : les variations de la densité d'un champ magnétique sont à l'origine, d'après la loi de Lenz-Faraday, de la création d'un **courant électrique induit**. Ce courant existe au sein de tout circuit conducteur placé au sein d'un CEM ; c'est ce qu'on appelle l'induction magnétique.

Les êtres vivants peuvent constituer de tels circuits, comme représenté sur la figure 2.

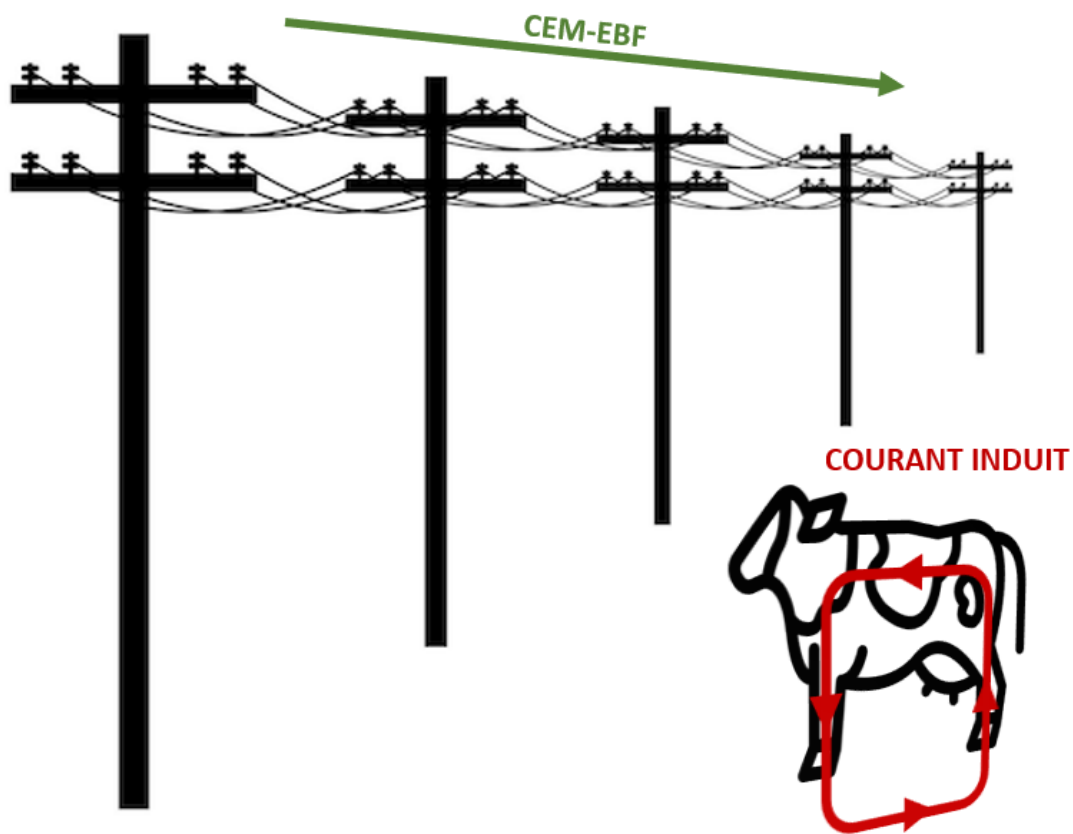


Figure 2 : Génération de courants induits au voisinage de champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence (CEM-EBF) ; (d'après Rigalma et al., 2009)

Pour un CEM donné, l'intensité du courant qui parcourt ces circuits est fonction de leur résistance, exprimée en Ohm (Ω). Or, si le corps humain a une résistance électrique entre 1000 et 5000 Ω (résistance qui peut être grandement augmentée lorsque l'on porte des bottes), celle des bovins peut descendre jusqu'à 200 Ω dans un élevage où le sol est humide (Rigalma et al, 2009). Ceci pourrait expliquer pourquoi l'Homme est peu sensible à ces courants induits, contrairement au bétail.

e. Sources des champs électromagnétiques alternatifs 50 Hz.

La très grande majorité des champs électromagnétiques de fréquence 50 Hz sont issus des appareils électriques branchés sur le réseau, ou du réseau électrique lui-même.

Le tableau suivant (Tableau I) présente quelques exemples d'ordre de grandeur de champs magnétiques et électriques rencontrés au quotidien.

Tableau I : Quelques exemples de valeurs de champs magnétiques et électriques au quotidien ; la valeur entre parenthèses est la distance entre la source et l'appareil de mesure (ANSES, 2015)

SOURCES	CHAMPS MAGNETIQUES (EN μ T)	CHAMPS ELECTRIQUES (EN V/M)
Sèche-cheveux (15 cm)	30 - 70	40
Four micro-onde (15 cm)	20 - 30	20-40
Télévision (30 cm)	0,7 - 2	60
Ligne Très Haute Tension de 400 kV (verticale de la ligne, 12 m)	30	6000
Ligne Très Haute Tension de 400 kV (30 m de la verticale)	12	2000
Ligne Très Haute Tension de 400 kV (100 m de la verticale)	1,2	200

Tout appareil transportant ou utilisant de l'électricité est à l'origine d'un champ électromagnétique. L'énergie que ce dernier véhicule dépend de sa fréquence. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (**CEM-EBF**). Ceux-ci ne transportent donc qu'une faible quantité d'énergie, mais ils sont omniprésents dans notre environnement. Ils peuvent être à l'origine d'effets indirects, tels que les courants induits.

II. Effets connus des champs électromagnétiques sur les êtres vivants.

1. Chez l'Homme.

a. Effets cancérogènes.

Une étude de grande ampleur (Géocap), réalisée en France entre 2002 et 2007, a mis en évidence un odds ratio augmenté (OR = 1,7) entre le risque de développer une leucémie aigüe chez l'enfant, et le fait d'habiter à moins de 50 m d'une ligne très haute tension. (Sermage-Faure *et al*, 2013). Cependant, l'étude Géocap n'est basée que sur une estimation géographique des risques ; les études basées sur des mesures de champs électromagnétiques n'ont pas permis de mettre en évidence une telle corrélation (Salvan *et al*, 2015, Wüncch-Filho *et al*, 2011). Aucune étude visant à comprendre le mécanisme biologique pouvant être à l'origine de cette maladie n'a obtenu de résultat à ce jour.

Les études sur les tumeurs cérébrales de l'enfant (Kheifets, 2010 et Su, 2018), le cancer du sein (Chen, 2013), et autres cancers de l'adulte (Carpenter, 2019) ne sont pas parvenues à conclure à un effet ou non de l'exposition aux CEM-EBF sur l'apparition de processus néoplasiques.

Depuis 2002, les CEM-EBF sont classés « cancérogènes possibles pour l'homme » par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) (ANSES, 2023).

b. Effets sur le système nerveux central.

Outre les effets cancérogènes, les CEM-EBF sont également suspectés d'être à l'origine de maladies neurodégénératives.

Il est possible que l'exposition professionnelle aux CEM-EBF soit corrélée à une augmentation du risque de démence avant 75 ans (Andel *et al*, 2010). Les études du lien entre une exposition professionnelle aux CEM-EBF et la sclérose latérale amyotrophique (Zhou *et al*, 2012) ou la maladie de Parkinson (Huss *et al*, 2015) n'ont pas mis en évidence de corrélation statistique.

L'exposition résidentielle aux CEM-EBF ne semble quant à elle significativement corrélée à l'occurrence d'aucune maladie neurodégénérative (Frei *et al*, 2013).

c. Intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM).

L'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) est un syndrome comprenant un certain nombre de symptômes ne pouvant être expliqués par une autre maladie. Les symptômes rencontrés peuvent être nerveux : fatigue, nausées, difficultés de concentration, céphalées, migraines, mais également dermatologiques ; rougeurs, démangeaisons, brûlures. (Mild *et al.*, 2006).

La prévalence estimée de l'IEI-CEM par l'ANSES en France à partir des études menées à l'international est de 5% (ANSES, 2017).

Aucune des études réalisées, où des individus atteints d'IEI-CEM et des individus témoins doivent détecter s'ils sont exposés ou non à un CEM, n'a obtenu de différence significative entre les deux groupes (ANSES, 2017 ; et pour la fréquence 50 Hz : Flodin, Seneby et Tegenfeldt, 2000).

d. Normes d'exposition aux CEM.

Afin de limiter ces effets, des normes maximales d'exposition sont recommandées.

Pour un CEM à la fréquence 50 Hz, l'ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) recommande une induction magnétique maximale de 200 μT pour une exposition publique et de 1000 μT pour une exposition professionnelle (professionnels formés et informés).

Le calcul de ces valeurs est basé sur le seuil minimal d'apparition des phosphènes magnétiques (troubles du champ de vision) chez l'Homme, qui est d'environ 5000 μT (à 20 Hz). Ce dernier est affublé d'un facteur de sécurité. Il est à noter que ces valeurs limites ne sont que très rarement atteintes au quotidien (ICNIRP, 2010).

En France, les valeurs limites d'exposition sont de 100 μT à 50 Hz pour une exposition résidentielle.

Pour une exposition professionnelle, les valeurs dépendent des zones du corps exposées ainsi que de la durée d'exposition (par exemple, pour une exposition corps entier quelques minutes par jour, la valeur limite est de 1000 μ T).

2. Etudes *in vitro*.

Des études utilisant des lignées cellulaires humaines ou animales ont exploré les effets du champ magnétique *in vitro*.

Les études sur la génotoxicité des CEM-EBF n'ont pas permis de révéler un effet significatif, sauf en cas de co-exposition à d'autres facteurs, en général des agents chimiques réputés mutagènes. Les rares études se penchant sur les effets d'une exposition à des CEM de faible intensité n'ont pas montré d'effet génotoxique (Lai, 2021).

Une étude sur des portions d'endomètres de truie prélevées en période pré-implantatoire de l'embryon (premiers jours de gestation) a révélé une baisse du taux de méthylation du génome dans les tissus exposés (Wydorski *et al.*, 2023). Cela laisse imaginer une potentielle toxicité d'ordre épigénétique.

Les CEM-EBF peuvent cependant induire l'apoptose de cellules saines et cancéreuses, avec un impact de l'intensité du champ mais aussi du temps d'exposition (Mansourian *et al.*, 2016). Il faut néanmoins souligner que ces effets sont atteints pour une forte exposition, peu rencontrée dans la vie courante (de l'ordre du milliTesla).

3. Etudes sur les rongeurs.

Une grande majorité des études *in vivo* ont été réalisées sur des rongeurs. On se propose ici d'en étudier une partie.

Une étude de l'évolution de la composition du plasma de rats soumis à un CEM-EBF a montré une baisse des taux de cholestérol et de triglycérides, surtout lors d'exposition à long terme (Coskun et Comlekci, 2010).

Une exposition à long terme (de l'ordre de plusieurs mois) à proximité directe d'une ligne haute tension de 170 kV (à 7,5 m) entraîne une inflammation et l'apoptose des hépatocytes chez le rat (Cevik *et al.*, 2017).

De même, l'exposition aux CEM-EBF provoque des effets neurodégénératifs associés à une hausse de la calcémie chez le rat (Çakit *et al.*, 2023), ainsi qu'une baisse des capacités d'apprentissage chez les jeunes souris (Sakhnini *et al.*, 2013).

Une étude italienne, sur plus de 7000 rats, a tenté de mettre en évidence le potentiel carcinogène d'une exposition à vie. Les rats, issus d'une même population souche, étaient élevés dans des conditions contrôlées de leur conception jusqu'à leur mort naturelle. Ils étaient soit élevés dans un milieu de vie témoin, soit exposés à des CEM de 0 à 1000 μT , d'une fréquence de 50 Hz. Parmi les rats exposés, une partie était aussi exposée au formaldéhyde ou à un rayonnement gamma. Tout au long de leur vie, le poids, la survie, la consommation d'eau et d'aliments des animaux étaient suivis. A leur mort, un examen histopathologique était pratiqué afin de détecter d'éventuels cancers.

Les résultats de l'étude n'ont pas permis de conclure à une différence significative sur l'ensemble des critères énoncés plus haut, entre le groupe témoin et les groupes exposés au CEM seul.

Cependant, l'exposition au CEM combiné au formaldéhyde ou au rayonnement gamma a engendré une augmentation du nombre de tumeurs détectées à la mort des animaux. Ceci vient conforter l'hypothèse d'un effet cancérigène des CEM-EBF lors de **co-exposition** uniquement (Bua *et al.*, 2018).

Une étude visant à explorer cette piste, a comparé le temps de survie de rats chez qui une leucémie avait été induite chimiquement, suivant leur exposition ou non à un CEM-EBF de 100 μT . Elle n'a pas mis en évidence de différence significative entre les deux groupes. (Bernard *et al.*, 2008).

Des études épidémiologiques et expérimentales montrent parfois une corrélation entre l'exposition aux CEM-EBF et l'apparition de tumeurs, mais aussi de lésions dégénératives sur de nombreux tissus. Ces études mettent en évidence, entre autres, un caractère génotoxique en tant que **co-facteur**.

Il est à noter que, bien souvent, les niveaux d'exposition sont supérieurs à ceux rencontrés au quotidien. Qui plus est, certaines études mettent en évidence une **relation dose reçue-effet**, comme pour la plupart des substances toxiques.

Par mesure de précaution, les CEM-EBF sont classés « **cancérogènes possibles** pour l'homme ».

4. Effets sur les animaux d'élevage.

Nous allons plus particulièrement nous intéresser dans cette partie aux effets sur les bovins.

a. Etudes en conditions réelles.

Des études en conditions réelles ont été menées : l'idée est d'étudier les effets des CEM-EBF en comparant des troupeaux pâturant sous des lignes électriques, à d'autres qui en sont éloignés.

Aux Etats-Unis, dans le Minnesota, une étude épidémiologique de longue durée a recueilli les données d'élevages d'exploitations laitières le long d'une ligne très haute tension de 400 kV en courant continu. Elle n'a pas permis de mettre en évidence de différence avec les exploitations des alentours, tant au niveau de la production laitière que des performances de reproduction (Martin *et al.*, 1986).

D'autres études le long de lignes du même type ont obtenu des résultats similaires pour des bovins de boucherie (Raleigh, 1988 ; Angell *et al.*, 1990).

Amstutz et Miller (1980) n'ont pas remarqué de modification du comportement, de la santé ou de la production laitière chez des animaux dont les pâtures sont sous une ligne de courant alternatif de 765 kV à 60 Hz.

Les résultats semblent transposables chez les agnelles, pour qui les taux de mélatonine, l'âge à la puberté et les cycles ovariens ne sont pas influencés par les CEM à 60 Hz (Lee *et al.*, 1993 ; Lee *et al.*, 1995).

Une étude suédoise portant sur des génisses Rouges Suédoises a comparé un groupe sous une ligne de courant alternatif de 400 kV à 50 Hz, à un groupe qui en était éloigné.

Les animaux sous la ligne étaient exposés en moyenne à un CEM de 2 μ T pour une période de 120 jours. Les chaleurs étaient observées pour les deux groupes et des inséminations étaient réalisées avec la même semence.

Les paramètres étudiés étaient la longueur et la régularité du cycle œstral, le taux de progestérone plasmatique, l'intensité des chaleurs, le taux de gestation et le nombre d'inséminations artificielles par gestation.

Les auteurs ne sont pas parvenus à révéler des différences entre les deux groupes sur l'ensemble de ces paramètres (Algers et Hultgren, 1987).

Une étude comportementale a permis de montrer que le bétail, qui d'ordinaire tend à s'aligner dans un axe Nord magnétique - Sud magnétique au pâturage, perd cet alignement sous les lignes HT et THT (Burda *et al.*, 2009).

Enfin, une étude a été réalisée en France dans le cadre d'une saisine de l'ANSES, visant à évaluer les plages de valeurs de CEM auxquels les animaux de rente sont exposés au quotidien. Des mesures auprès de différentes installations électriques ont été réalisées dans trente élevages de toutes productions (bovins mais aussi porcins, aviaires...). La valeur maximale de champ magnétique rencontrée vaut 24 μT , il s'agit d'une armoire électrique. Ces mesures sont cependant réalisées à 30 cm des installations, alors que les animaux ne sont jamais au contact de la plupart d'entre elles. Si l'on ne garde que les équipements à proximité directe des animaux, les valeurs les plus élevées sont 0,42 μT et 0,25 μT , respectivement pour le distributeur automatique de concentrés et pour le robot de traite. Ces valeurs ne provenant que d'un nombre extrêmement réduit de mesures, elles doivent être interprétées avec prudence.

Une deuxième partie de l'étude menée par l'ANSES avait pour objectif de comparer l'exposition quotidienne aux CEM-EBF d'une vache laitière, suivant qu'elle pâture à proximité de lignes très haute tension ou non. Treize vaches ont été équipées de dispositifs d'enregistrement de CEM en continu pour une durée de 8h (exploitation éloignée de lignes THT) ou de 24h (exploitation située entre 17 et 70 m de lignes THT). Pour les exploitations proches de lignes THT, le niveau maximal d'exposition a atteint 3,5 μT , contre 0,16 μT pour les exploitations éloignées. Les animaux étaient cependant la majeure partie du temps exposés à des valeurs de CEM inférieures respectivement à 1 μT , contre 0,1 μT . Les auteurs recommandent cependant la réalisation d'une étude à plus grande échelle afin de valider ces données (ANSES, 2013a).

La saisine de l'ANSES a conclu que le nombre de preuves était trop restreint pour pouvoir répondre quant aux effets délétères des CEM-EBF sur les animaux de rente.

Les études menées sur le terrain depuis plus de 40 ans tendent à prouver que les animaux de rente, qui sont exposés à des **valeurs de CEM très faibles**, ne sont **pas impactés** par ces derniers.

Ces études s'intéressent particulièrement aux CEM générés par les lignes de transport d'électricité.

Cependant, ces études sont peu nombreuses et non standardisées, ce qui montre l'utilité d'études en milieu contrôlé.

b. Etudes en milieu contrôlé.

Nous allons nous pencher dans cette partie sur une série d'études réalisées au *Department of Animal Science* de l'Université de McGill, à Saint-Anne-de-Bellevue au Québec. Ces études ont été réalisées à la demande de l'entreprise Hydro-Québec, responsable entre autres de la distribution d'électricité dans le pays.

Toutes ces expérimentations reposent sur une chambre d'exposition aux CEM unique en son genre, intégrant huit stalles à bovins ainsi que de gigantesques bobines à l'origine d'un champ magnétique de 30 μT à 60 Hz (cela correspond à la valeur maximale atteinte sous les lignes THT canadiennes, à 765 kV). La disposition des stalles dans la chambre d'exposition est telle que tous les sujets subissent la même exposition aux CEM-EBF. Une autre chambre d'expérimentation, sans les bobines, sert de témoin (Nguyen *et al.*, 2005) (figure 3).

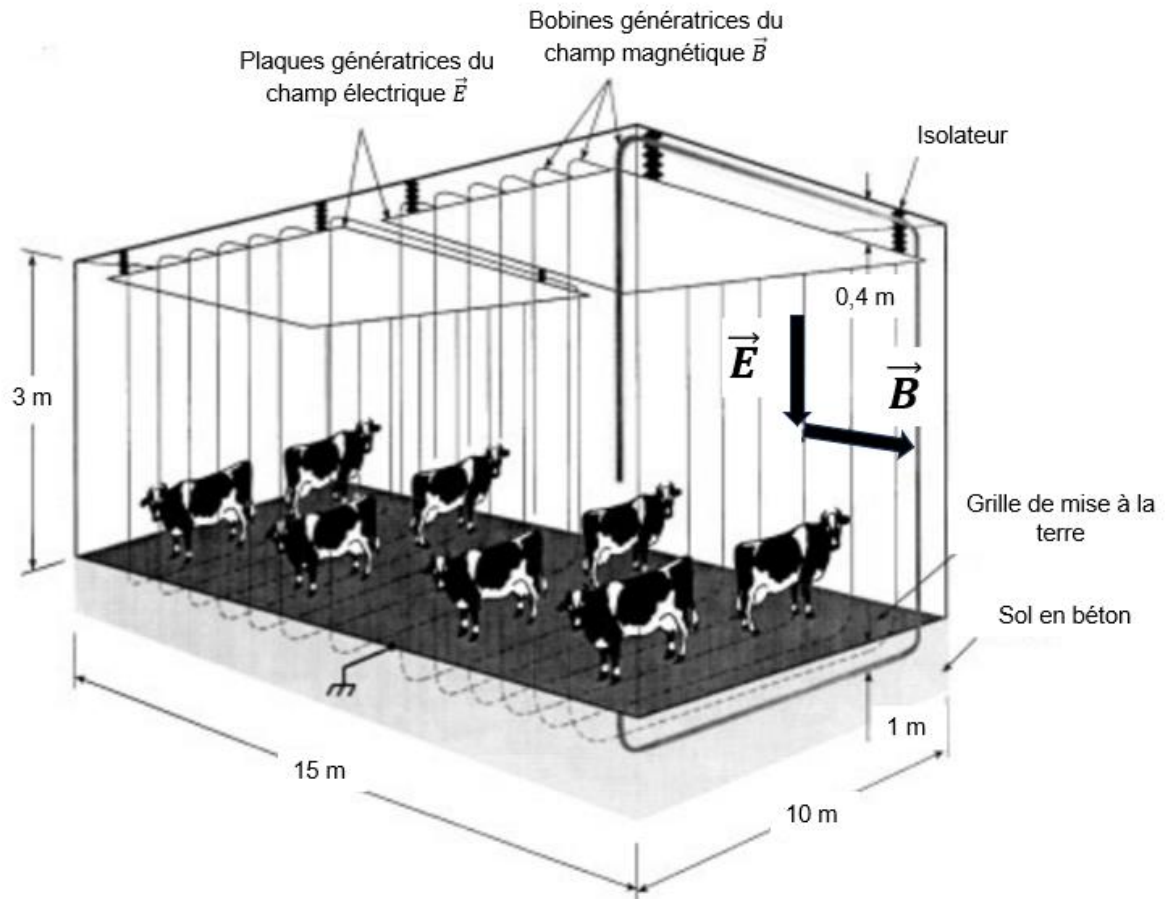


Figure 3 :
 En haut : Schéma de la chambre d'exposition de l'université McGill (d'après Nguyen, 2005).
 En bas : Photographie de l'intérieur de la chambre d'exposition de l'université McGill (Hydro-Québec, 2023)

Il est à noter que les stalles sont en bois, d'une part car c'était le matériau classique au Canada à l'époque de la construction, et d'autre part afin d'éviter la création de courants induits, qui ne sont pas l'objet de l'étude.

L'intérêt de ce système est de pouvoir contrôler tous les paramètres pouvant influencer sur les critères que l'on souhaite évaluer : luminosité, température, durées du jour et de la nuit, alimentation...

Afin de limiter l'influence de caractéristiques propres à chaque animal, la plupart de ces expériences sont conduites sur un mode *ON/OFF* : un groupe de huit animaux subit d'abord 4 semaines en chambre témoin, puis 4 semaines en chambre d'exposition. Ainsi, chaque individu constitue son propre témoin. Les animaux étudiés étaient de race Holstein.

Les études menées dans ces chambres ont montré une modification des paramètres sanguins lors de l'exposition à un CEM-EBF pendant 4 semaines. En particulier, les auteurs ont observé de manière significative une baisse de la magnésémie, ainsi qu'une baisse des taux de calcium, de phosphore, de fer et de magnésium dans le liquide cérébro-spinal (Burchard *et al.*, 1999).

Plus tard, une expérimentation a montré une élévation du taux de thyroxine (T4) plasmatique dans les mêmes conditions (Burchard *et al.* 2006). Les auteurs ont également pu montrer que l'exposition aux CEM-EBF à hauteur de 30 μ T entraîne une baisse du taux de mélatonine chez les vaches pendant la phase de jour (Rodriguez *et al.*, 2004), sans qu'il y ait d'effet notable la nuit (Burchard *et al.*, 1998a).

Chez des génisses gestantes, une baisse des taux d'*insuline-like growth factor 1* (IGF-1) et de prolactine a été notée (Burchard *et al.*, 2007). A l'inverse, chez les vaches gestantes en lactation la prolactine est augmentée (Rodriguez *et al.*, 2004).

Ces observations laissent supposer une perturbation de la perception de la photopériode chez les animaux exposés au CEM-EBF. Cette hypothèse est d'ailleurs renforcée par l'étude de Kolbabova *et al.* (2015), qui a révélé des taux de mélatonine plus élevés en été et plus faibles en hiver chez des veaux exposés à un CEM de l'ordre de 0,1 μ T à 50 Hz.

Du point de vue des performances de reproduction, les expériences montrent qu'il n'y a pas de modification du taux de progestérone plasmatique, mais que les vaches exposées aux CEM-EBF ont une phase lutéale plus longue (Burchard *et al.*, 1998b).

Cela se traduit par une augmentation légère mais significative de la durée du cycle ovarien, de l'ordre de 1 à 2 jours (Rodriguez *et al.*, 2003).

Enfin, on remarque chez les multipares en lactation non gestantes soumises à un CEM-EBF une production laitière plus basse d'environ 1 kg (5%) par jour, et un taux de matières grasses diminué de 16% en moyenne. En parallèle, l'ingestion de matière sèche augmente de près de 1 kg par jour (Burchard *et al.*, 2003). Les auteurs supposent que cette augmentation de la consommation d'aliment associée à une baisse de production est à l'origine d'une prise de poids de l'animal.

L'exposition de génisses gestantes à un CEM est à l'origine d'une augmentation significative du gain de poids moyen hebdomadaire, de plus de 2 kg en moyenne (Burchard *et al.*, 2007), ce qui semble corroborer cette hypothèse.

Les études menées par les chercheurs de l'université McGill ont permis la mise en évidence de effets des CEM-EBF sur la **physiologie** ainsi que sur **les performances zootechniques** des bovins laitiers. Cependant, ces études sont menées sur de courtes durées d'exposition, et à de fortes valeurs de CEM, qui ne sont jamais rencontrées en France.

Les études manquent concernant l'effet des CEM-EBF générés par des équipements de l'exploitation sur les performances des animaux de production. Au sein d'un élevage, comme nous l'avons vu plus haut, une des sources principales de CEM-EBF est le **robot de traite**, outil qui équipe de plus en plus de fermes : en 2021, 88% des nouvelles installations de traite en France sont des robots (IDELE, 2023).

On peut alors se demander si l'exposition à un CEM-EBF de façon quotidienne pourrait avoir un effet sur la **qualité du lait** produit ; c'est l'objet de notre étude. L'hypothèse étudiée est que les CEM-EBF générés par les robots de traite entraînent une augmentation de la moyenne des taux cellulaires du troupeau.

DEUXIEME PARTIE : LIEN ENTRE CHAMP MAGNETIQUE MESURE DANS LE ROBOT DE TRAITE ET TAUX CELLULAIRE DE TROUPEAU

Afin de pouvoir comparer les valeurs des CEM-EBF au sein des différentes exploitations, il a d'abord fallu s'assurer que ces derniers ne variaient pas au cours de la journée ; c'est le thème de notre pré-étude.

I. Pré-étude : variations de champ magnétique au cours de la journée.

1. Objectifs.

L'objectif de la pré-étude était de déterminer s'il existait des variations journalières du champ magnétique au sein des robots de traite, afin de savoir si les mesures de l'étude pouvaient s'étaler au cours de la journée ou non.

2. Matériels.

La pré-étude a été menée durant la journée du 31 octobre 2023 dans deux élevages de la clientèle du Groupe Vétérinaire Néocastrien, dans les Vosges.

Les deux élevages sont situés à Frébécourt (88), l'un était équipé d'un robot VMS DeLaval (Elevage 1), tandis que l'autre utilisait un robot Lely Astronaut (Elevage 2).

L'appareil utilisé pour les mesures de champ magnétique était le teslamètre digital MG-2000T de la marque LATNEX® (figure 4).



Figure 4 : L'appareil de mesure du champ magnétique utilisé dans cette étude (LATNEX, 2023)

Cet appareil permet une mesure moyennée du champ magnétique ambiant en trois axes (x, y, z), pour des champs alternatifs dont la fréquence varie de 30 à 2000 Hz.

La mesure obtenue est d'une résolution de 0,001 μT et d'une précision de 3% à 50 Hz. Les valeurs ne sont fiables que pour une humidité relative de 80%. (LATNEX, 2023)

3. Méthode.

Les mesures de champ magnétique ont été réalisées de 9h à 19h, toutes les heures. Les plages d'horaires de mesure n'ont pas pu être plus étalées car la présence de l'opérateur effrayait les vaches et entraînait donc un retard de traite qui a nécessité l'intervention régulière des éleveurs.

L'appareil était tenu par l'opérateur au sein du robot, au-dessus du bassin d'une vache, durant la phase de traite (figure 5). Cet emplacement a été choisi car c'est celui qui permettait d'approcher le plus possible l'exposition de la mamelle sans compromettre le bien-être de la vache ainsi que le bon fonctionnement du robot.



Figure 5 : Méthode de mesure du champ magnétique dans le robot

Chaque valeur reportée résulte d'une moyenne de trois mesures successives sur une même vache, obtenues après stabilisation de l'appareil.

Les nuages de points ont ensuite été tracés grâce au logiciel Microsoft Excel 2020.

La distance entre les deux élevages était suffisamment courte pour permettre l'acquisition des mesures de façon quasi-simultanée d'un élevage à l'autre.

4. Résultats.

Les résultats sont visibles sur la figure 6. Les valeurs de champ magnétique dans les robots se sont étalées de 0,031 à 0,059 μT pour l'élevage 1 et de 0,026 à 0,055 μT pour l'élevage 2. On constate que les valeurs varient du simple au double au cours de la journée.

Les résultats des deux élevages sont compilés dans le graphique ci-dessous. Les barres d'erreur correspondent à l'incertitude de l'appareil de mesure (3%). On remarque que le champ magnétique évolue dans le même sens dans les deux élevages.

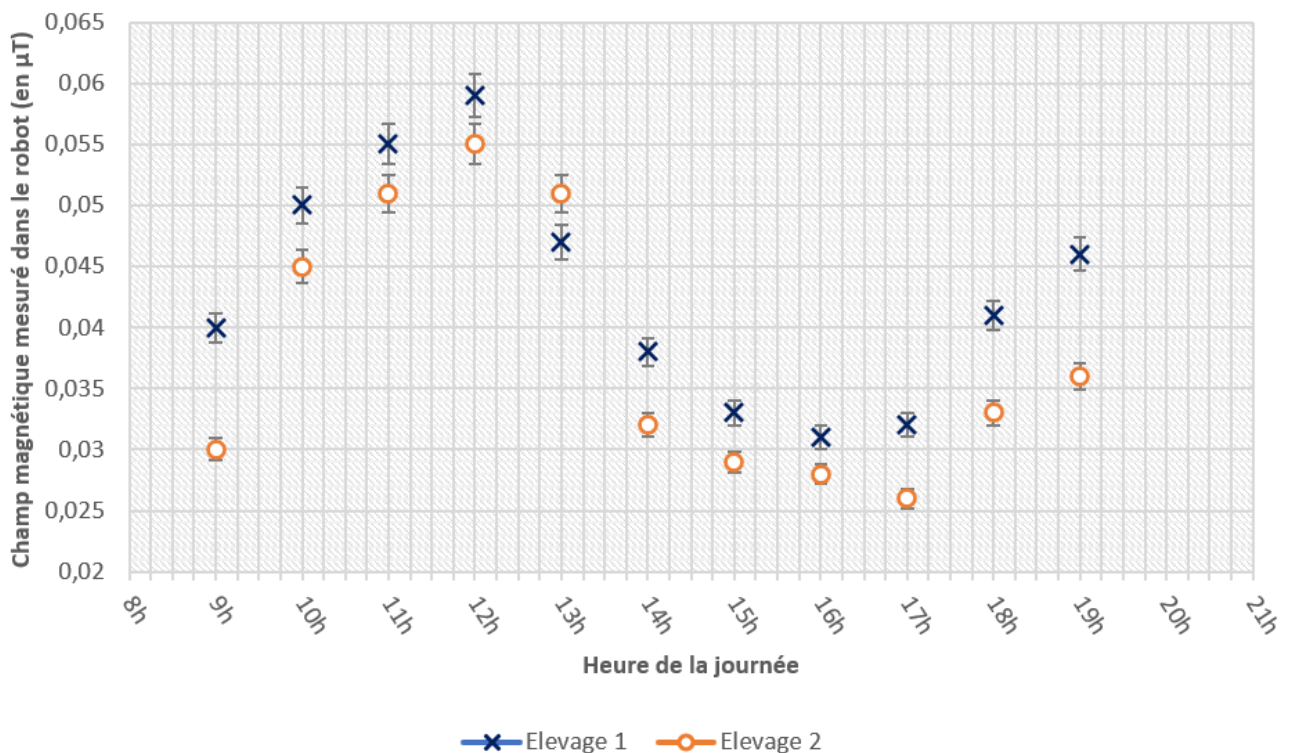


Figure 6 : Champ magnétique mesuré dans le robot en fonction de l'heure

Afin de tenter d'expliquer de telles variations, rappelons-nous que le champ magnétique généré par un corps lorsqu'il est traversé par un courant électrique dépend de l'intensité de ce courant. Ainsi, toute variation de champ magnétique peut traduire une variation d'intensité de courant électrique.

Au sein de notre réseau électrique, la tension est constante (230 V sur le secteur par exemple) ; l'intensité (et par conséquent le champ magnétique) varie donc proportionnellement à la puissance demandée, c'est-à-dire la consommation électrique instantanée.

Mettons alors en perspective les données de la pré-étude avec la consommation électrique française instantanée (en mégawatts, MW) heure par heure de la journée du 31 octobre 2023 (RTE, 2023). Le résultat est reproduit sur la figure 7 :

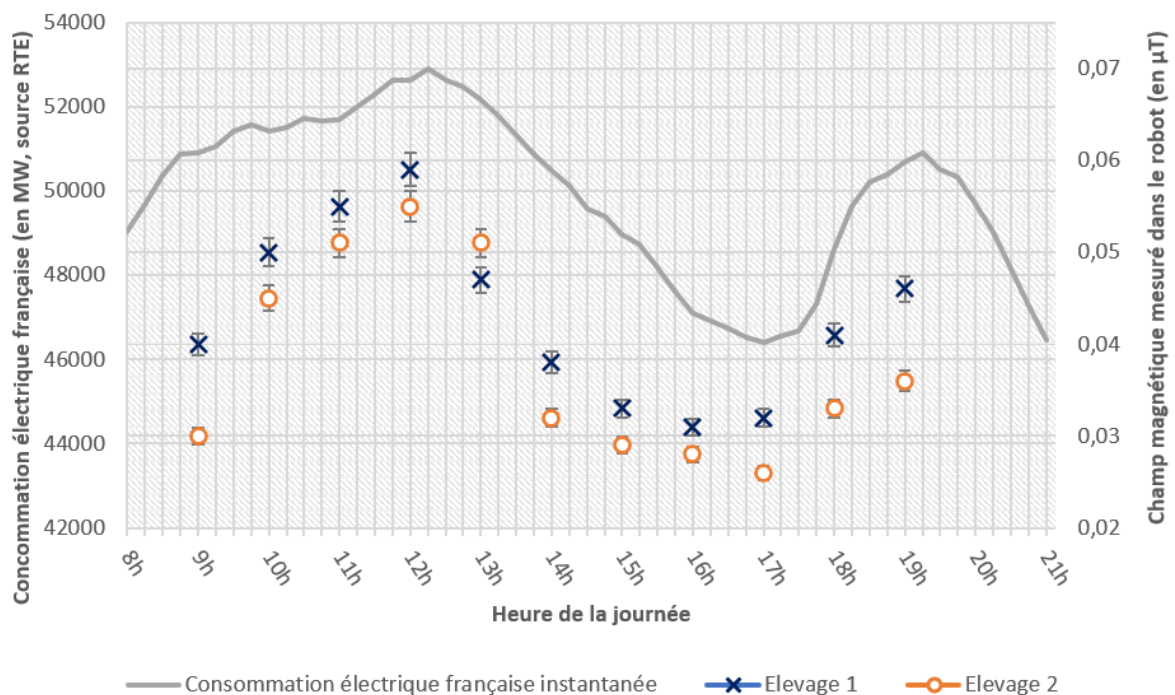


Figure 7 : Champ magnétique mesuré dans le robot et consommation électrique française (RTE, 2023) en fonction de l'heure

On observe que l'évolution de l'intensité du champ magnétique au cours de la journée est comparable à l'évolution de la consommation électrique française instantanée. On peut supposer au vu de ces résultats que le champ magnétique au sein du robot de traite a, au moins en partie, une composante due au réseau électrique environnant.

5. Conclusion.

Les résultats de cette pré-étude ont montré des variations journalières de champ magnétique au sein des robots de traite ; il faut alors fixer des heures de mesures précises pour notre étude, afin de pouvoir comparer les CEM des élevages entre eux.

On remarque que les valeurs de 15h à 16h sont suffisamment stables pour pouvoir comparer les élevages en s'affranchissant de la variabilité horaire des CEM. Les mesures de l'étude devront donc être réalisées sur cette plage horaire dans les différents élevages.

II. Etude : Mise en évidence d'une corrélation entre champ magnétique de robot de traite et comptage cellulaire de troupeau.

1. Objectif.

L'objectif de cette étude était de mettre en évidence une éventuelle corrélation entre le champ magnétique mesuré dans le robot de traite d'une exploitation et le comptage cellulaire du troupeau de cette exploitation.

2. Matériels et méthodes.

a. Elevages inclus dans l'étude.

L'étude a porté sur trente élevages, afin de disposer de suffisamment de données. Il s'agissait d'élevages laitiers en traite robotisée et adhérents au contrôle laitier. Ils faisaient tous partie de la clientèle du Groupe Vétérinaire Néocastrien, et étaient situés dans les départements de la Haute-Marne (52), des Vosges (88) et de la Meuse (55).

Au moment de l'étude, les élevages comptaient entre 47 et 125 vaches en lactation.

La répartition en nombre d'exploitations des modèles de robots rencontrés est donnée en figure 8 : 20 élevages étaient équipés de Lely Astronaut, 6 de VMS DeLaval, 2 de Merlin Fullwood et 2 de Proflex Boumatic.

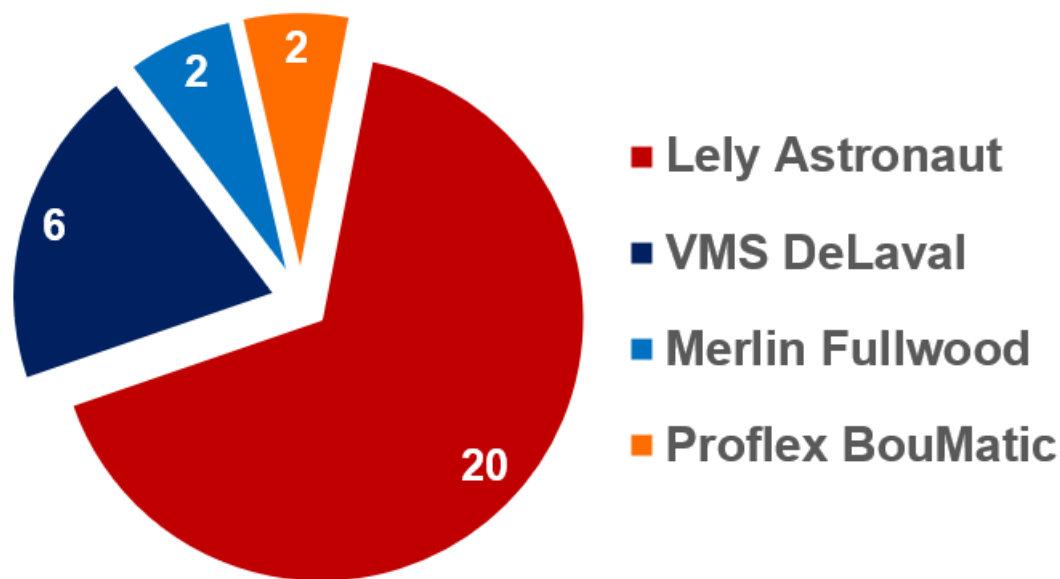


Figure 8 : Répartition des modèles de robots rencontrés dans l'étude

b. Mesure du champ magnétique.

L'appareil utilisé pour les mesures de champ magnétique était le teslamètre digital MG-2000T de la marque LATNEX®.

c. Comptage cellulaire de troupeau.

La valeur de taux cellulaire de troupeau utilisée dans cette étude était issue des données de contrôle laitier, afin d'inclure les vaches « à cellules » dont le lait peut être détourné du tank.

En traite robotisée, un contrôle laitier correspond à l'analyse des échantillons de chacune des traites réalisées sur une période de 96 heures.

En particulier, la valeur du comptage cellulaire d'une vache est en réalité la moyenne des comptages cellulaires des échantillons collectés au cours des 96 heures de contrôles. Cette moyenne est pondérée en fonction de la production laitière à chaque passage de la vache.

Le comptage cellulaire de troupeau est ensuite déterminé en réalisant la moyenne, là encore pondérée en fonction de la production laitière, des comptages cellulaires des vaches traites lors du contrôle (IDELE, 2020).

Les élevages de l'étude étaient tous adhérents au contrôle laitier, à des fréquences de contrôle cependant différentes.

Afin d'obtenir un taux cellulaire représentatif d'un élevage à l'autre, la valeur utilisée correspond à une moyenne des contrôles laitiers réalisés durant les trois mois précédant la mesure de champ magnétique (ce qui représente, suivant les élevages, entre 2 et 3 contrôles selon que ceux-ci sont réalisés toutes les 6 ou 4 semaines). Une donnée par élevage a ainsi été obtenue et utilisée dans les analyses.

Le passage dans l'exploitation pour mesurer le champ magnétique était également l'occasion de collecter les données de contrôle laitier.

3. Méthode de mesure du champ électromagnétique.

Suite aux résultats de la pré-étude, l'ensemble des mesures de champ magnétique ont été réalisées de 15h à 16h, sur une période de deux semaines (début novembre 2023). L'appareil était tenu par l'opérateur au sein du robot, au-dessus du bassin d'une vache, durant la phase de traite.

Une mesure du champ magnétique ambiant dans le bâtiment a également été réalisée afin de comparer les valeurs d'exposition des vaches pendant la traite à celles le reste du temps ; il s'agit d'une moyenne en trois points aléatoires.

Chaque valeur reportée résulte d'une moyenne de trois mesures obtenues sur une même vache après stabilisation de l'appareil. Dans le cas où plusieurs robots étaient présents dans une même exploitation, une moyenne était réalisée entre les valeurs des différents robots.

Les graphes ainsi que les valeurs statistiques ont été calculés sur le logiciel R (R, 2023).

4. Résultats.

a. Répartition des valeurs de taux cellulaires.

La répartition des taux cellulaires de troupeau (figure 9) est comprise entre 86 000 et 557 000 leucocytes par millilitre. La médiane est de 228 000 leucocytes par millilitre.

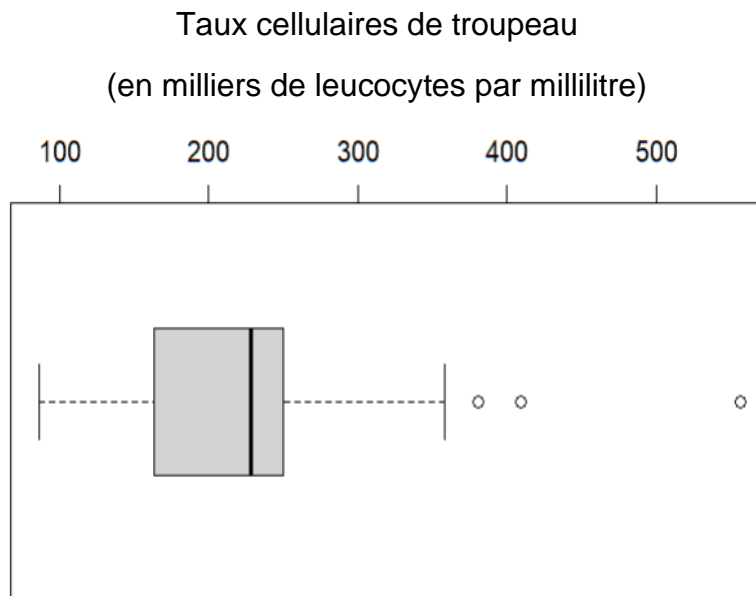


Figure 9 : Diagramme de répartition des taux cellulaires de troupeau de l'étude

La moyenne des taux cellulaires de troupeau de l'étude est de 230 500 leucocytes par millilitre.

b. Champ magnétique ambiant et champ magnétique dans les robots.

La répartition des champs magnétiques est donnée dans la figure 10.

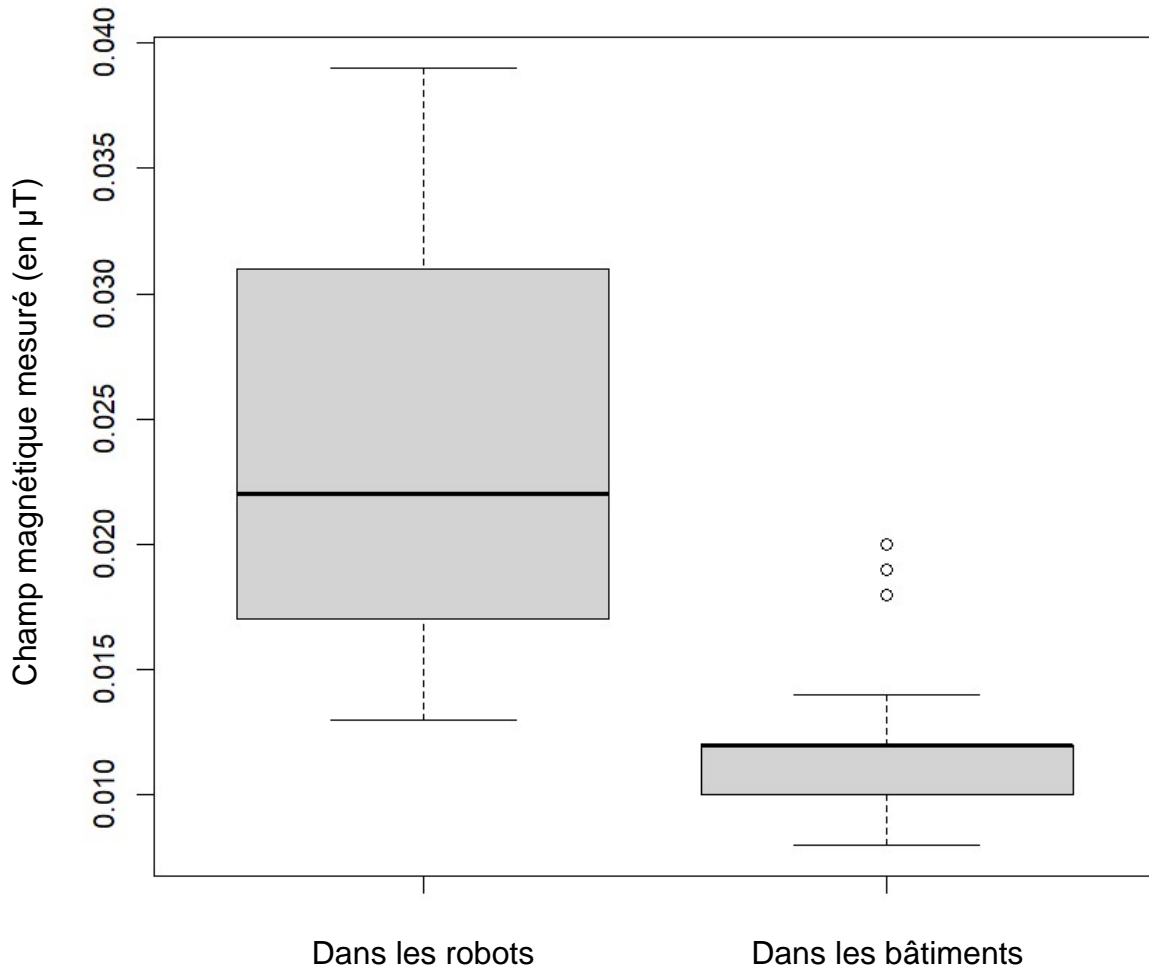


Figure 10 : Diagrammes de répartition des champs magnétiques mesurés en fonction du lieu de mesure

Les valeurs de champ magnétique mesurés dans les robots de l'étude s'étendaient de 0,013 à 0,039 μT , avec une médiane à 0,22 μT .

On constate une variabilité plus faible d'un bâtiment à l'autre que d'un robot à l'autre. De plus, on constate une différence significative entre les deux lieux : les champs magnétiques mesurés dans les robots sont 1,25 à 3,5 fois plus élevés que dans les bâtiments associés.

c. Variabilité entre les modèles de robots.

La répartition des champs magnétiques mesurés en fonction du modèle de robot est donnée dans la figure 11 :

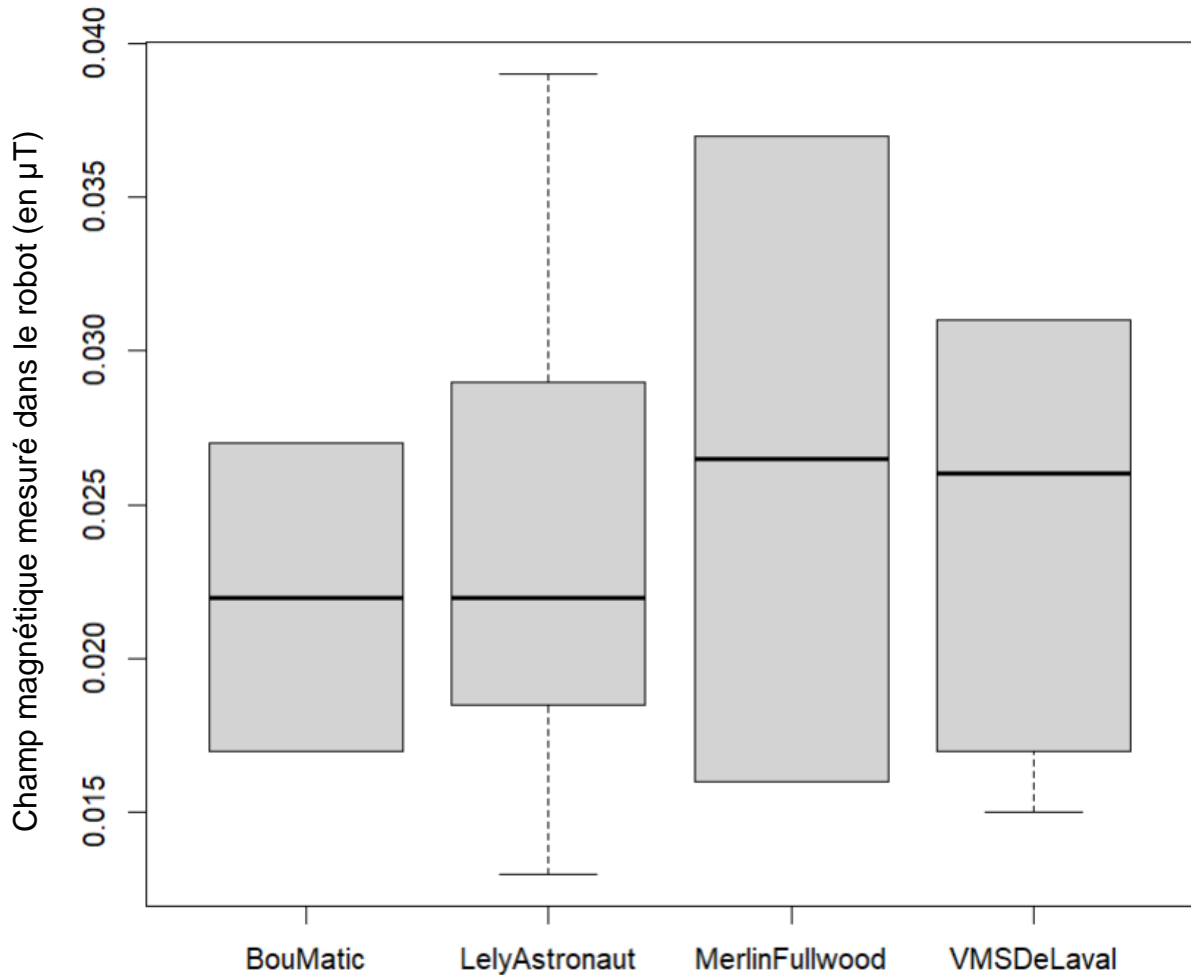


Figure 11 : Diagrammes de répartition des champs magnétiques mesurés en fonction du modèle de robot de traite

On ne constate pas de différence majeure d'émission de champ magnétique entre les différents modèles de robots de traite rencontrés, bien que les échantillons pour certains robots soient très faibles.

d. Comparaison des taux cellulaires en fonction du champ magnétique.

Pour cette partie, les élevages ont été séparés en deux groupes égaux en nombre d'exploitations, en fonction de la valeur du champ magnétique mesuré dans le robot de traite de l'exploitation : le groupe 1 (N = 15) correspond aux fermes dont le champ magnétique est inférieur à 0,022 μT (soit la médiane de l'échantillon), le groupe 2 (N = 15) correspond aux fermes dont le champ magnétique est supérieur à cette valeur.

Les moyennes de champ magnétique des groupes 1 et 2 sont respectivement de 0,017 μT et 0,030 μT .

La répartition des valeurs des comptages cellulaires des deux groupes est représentée dans la figure 12.

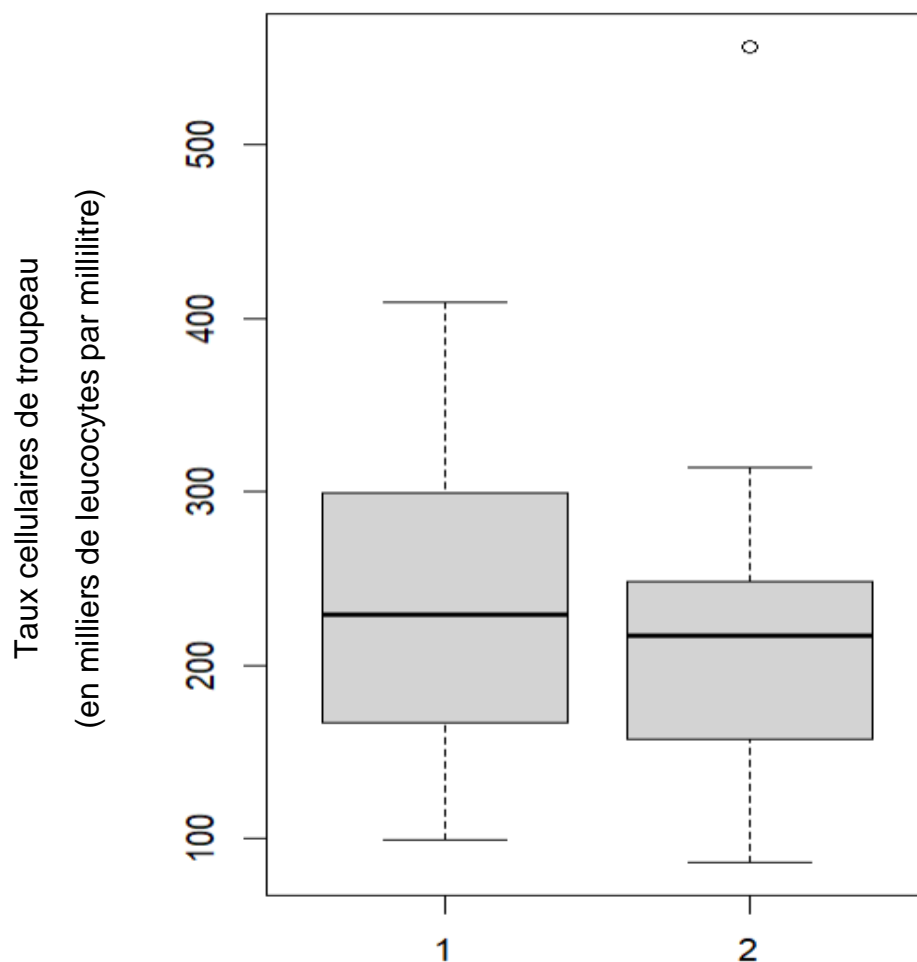


Figure 12 : Diagrammes de répartition des taux cellulaires de troupeau en fonction du groupe (1: CEM < 0,022 μT ; 2: CEM > 0,022 μT)

Les valeurs de taux cellulaires s'étendent de 99 000 à 409 000 leucocytes par millilitre pour le groupe 1, et de 86 000 à 557 000 leucocytes par millilitre pour le groupe 2. Le taux cellulaire médian est de 229 000 leucocytes par millilitre pour le groupe 1, contre 217 000 leucocytes par millilitre pour le groupe 2.

A première vue, les répartitions semblent comparables entre les deux groupes.

Afin de s'en assurer, un test de la somme des rangs de Mann-Whitney-Wilcoxon a été réalisé grâce au logiciel R. Ce test a révélé une *p-value* = 0,6186, on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse H_0 selon laquelle il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes étudiés.

5. Conclusions.

D'après ces résultats, l'exposition moyenne des troupeaux inclus dans l'étude, tant dans les bâtiments que lors de la traite, est très faible comparée aux niveaux d'exposition utilisés en expérimentation.

Les champs magnétiques mesurés sont 1,25 à 3,5 fois supérieurs dans les robots de traite que dans les bâtiments associés, ce qui confirme les mesures d'exposition en continu réalisées par l'ANSES (ANSES, 2013a) qui révélaient de plus fortes valeurs de champ magnétique à l'approche des appareils électriques, notamment du robot de traite.

L'étude réalisée par l'ANSES (ANSES, 2013a) mesurait un champ magnétique de 0,25 μT dans un robot de traite (une seule mesure effectuée), bien loin de la valeur maximale de notre étude (0,039 μT). Cependant l'appareil de mesure utilisé n'était pas le même, et le protocole de mesure n'est pas précisé.

On ne constate pas de différence significative d'émission de champ magnétique d'un modèle de robot de traite à l'autre.

Enfin, l'exploitation des données de cette étude ne permet pas de conclure à une différence significative des valeurs de comptage cellulaires de troupeau entre les troupeaux exposés aux CEM les plus forts lors de la traite, et ceux exposés aux CEM les plus faibles.

Ces résultats semblent conforter ceux obtenus dans les études réalisées en conditions réelles ainsi qu'en milieu contrôlé (Burchard *et al.* 1996, 1998, 1999, 2004, 2006, 2007 et 2009 ; Nguyen *et al.*, 2005a et 2005b ; Rodriguez *et al.*, 2003 et 2004). Les études réalisées dans la chambre d'exposition de l'université McGill n'ont, en effet, pas mis en évidence de dégradation majeure de la qualité du lait suite à une exposition mille fois supérieure aux valeurs rencontrées dans notre étude.

6. Limites.

Cette étude ne prend en compte que des moyennes de taux cellulaires de troupeau ; la prise en compte des taux cellulaires individuels aurait augmenté la puissance du test statistique et aurait ainsi pu, peut-être, mettre en évidence une éventuelle différence significative entre les deux groupes.

Qui plus est, les mesures n'ont été réalisées qu'à une période donnée qui ne correspond pas au maximum d'émission de champ électromagnétique, ce qui a pu minimiser les écarts d'une ferme à l'autre. Des suivis d'émission en continu (sur 24h par exemple) pourraient permettre d'investiguer ce point.

CONCLUSION

De nos jours, les équipements électriques sont omniprésents dans les ouvrages agricoles. Or, comme nous l'avons vu, tout appareil électrique génère un champ électromagnétique dans l'environnement qui l'entoure. On est alors en droit de redouter les effets de ces champs, en particulier les champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence (CEM-EBF).

Les études réalisées semblent montrer des effets relativement négligeables à court et moyen termes sur les animaux de production, même à des niveaux d'exposition bien supérieurs à ceux rencontrés dans les bâtiments d'élevage.

Cette thèse a examiné les effets des champs électromagnétiques, en particulier ceux générés par les robots de traite, sur les bovins laitiers, en se concentrant sur l'impact sur le taux cellulaire du troupeau. Elle a permis de mettre en évidence une variabilité de l'intensité du CEM-EBF aux abords du robot au cours de la journée, mais également d'une exploitation à l'autre, quel que soit le modèle de robot étudié. Cette variabilité semble être liée aux variations d'intensité du courant traversant les lignes d'alimentation électrique.

Cependant, les résultats de cette étude ne permettent pas de révéler de corrélation entre CEM mesuré et taux cellulaire de troupeau. L'exposition à un champ électromagnétique extrêmement basse fréquence ne semble donc pas influencer sur les taux cellulaires.

Des études plus approfondies devraient permettre de confirmer ou d'infirmer ces résultats à plus grande échelle, et de déterminer des intervalles de valeurs rencontrés sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- Algers, B., & Hultgren, J. (1987). Effects of long-term exposure to a 400-kV, 50-Hz transmission line on estrous and fertility in cows. *Preventive Veterinary Medicine*, 5(1), 21-36. [https://doi.org/10.1016/0167-5877\(87\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0167-5877(87)90003-1)
- Amstutz, H. E., & Miller, D. B. (1980). A Study of farm animals near 765kV transmission lines. *The Bovine Practitioner*, 1980(15), 51–62. <https://doi.org/10.21423/bovine-vol1980no15p51-62>
- Andel, R., Crowe, M., Feychting, M., Pedersen, N. L., Fratiglioni, L., Johansson, B., & Gatz, M. (2010). Work-related exposure to extremely low-frequency magnetic fields and dementia : Results from the population-based study of dementia in Swedish twins. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 65(11), 1220-1227. <https://doi.org/10.1093/gerona/qlq112>
- Andrianome, S. (2017). *Intolérance environnementale idiopathique avec attribution aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) : Étude des systèmes nerveux sympathique, endocrinien et immunitaire* [Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne], 258. <http://www.theses.fr/2017AMIE0016/document>
- Angell, R. F., Schott, M. R., Raleigh, R. J., & Bracken, T. D. (1990). Effects of a high-voltage direct-current transmission line on beef cattle production. *Bioelectromagnetics*, 11(4), 273-282. <https://doi.org/10.1002/bem.2250110404>
- Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. *Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences*. (2013a, janvier 12). <https://www.anses.fr/fr/content/champs-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-extr%C3%AAmement-basses-fr%C3%A9quences>
- Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. *Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences*. (2013b, janvier 12). <https://www.anses.fr/fr/content/champs-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-extr%C3%AAmement-basses-fr%C3%A9quences>
- Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. *Hypersensibilité aux ondes électromagnétiques : Amplifier l'effort de recherche et adapter la prise en charge des personnes concernées*. (2018, mars 27). <https://www.anses.fr/fr/content/hypersensibilit%C3%A9-aux-ondes-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-amplifier-l%E2%80%99effort-de-recherche-et-adapter-la>
- Aurengo, A., Clavel, J., de Seze, R., Guénel, P., Jousset-Dubien, J., & Veyret, B. *Champs Magnétiques d'Extrêmement Basse Fréquence et Santé*. 68.
- Bernard, N., Alberdi, A. J., Tanguy, M.-L., Brugere, H., Helissey, P., Hubert, C., Gendrey, N., Guillosson, J.-J., & Nafziger, J. (2008). Assessing the Potential Leukemogenic Effects of 50 Hz Magnetic Fields and their Harmonics Using an Animal Leukemia Model. *Journal of Radiation Research*, 49(6), 565-577. <https://doi.org/10.1269/jrr.08019>

- Bocquet, J.-C. (2000). *Contribution à l'étude des effets biologiques des champs électriques et d'inductions magnétiques 50-60 Hertz* [Thèse de Doctorat Vétérinaire]. Créteil. 136.
- Brugère, H. (1993). *Champs électro-magnétiques : Effets sur les productions animales. Dépêche technique Supplément 30*, 19.
- Bua, L., Tibaldi, E., Falcioni, L., Lauriola, M., De Angelis, L., Gnudi, F., Manservigi, M., Manservigi, F., Manzoli, I., Menghetti, I., Montella, R., Panzacchi, S., Sgargi, D., Strollo, V., Vornoli, A., Mandrioli, D., & Belpoggi, F. (2018). Results of lifespan exposure to continuous and intermittent extremely low frequency electromagnetic fields (ELFEMF) administered alone to Sprague Dawley rats. *Environmental Research*, 164, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.036>
- Burchard, J. F., Monardes, H., & Nguyen, D. H. (2003). Effect of 10 kV, 30 μ T, 60 Hz electric and magnetic fields on milk production and feed intake in nonpregnant dairy cattle. *Bioelectromagnetics*, 24(8), 557-563. <https://doi.org/10.1002/bem.10132>
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Block, E. (1998a). Effects of Electric and Magnetic Fields on Nocturnal Melatonin Concentrations in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 81(3), 722-727. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75628-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75628-0)
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Block, E. (1998b). Progesterone concentrations during estrous cycle of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 19(7), 438-443.
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Block, E. (1999). Macro- and trace element concentrations in blood plasma and cerebrospinal fluid of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 20(6), 358-364.
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Monardes, H. G. (2007). Exposure of pregnant dairy heifer to magnetic fields at 60 Hz and 30 μ T. *Bioelectromagnetics*, 28(6), 471-476. <https://doi.org/10.1002/bem.20325>
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Rodriguez, M. (2006). Plasma concentrations of thyroxine in dairy cows exposed to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 27(7), 553-559. <https://doi.org/10.1002/bem.20253>
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., Monardes, H. G., & Petitclerc, D. (2004). Lack of effect of 10 kV/m 60 Hz electric field exposure on pregnant dairy heifer hormones. *Bioelectromagnetics*, 25(4), 308-312. <https://doi.org/10.1002/bem.20020>
- Burchard, J. F., Nguyen, D. H., Richard, L., & Block, E. (1996). Biological effects of electric and magnetic fields on productivity of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 79(9), 1549-1554. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76516-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76516-5)
- Burda, H., Begall, S., Cervený, J., Weisse, J., & Němec, P. (2009). Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 5708-5713. <https://doi.org/10.1073/pnas.0811194106>
- Çakit, M. O., Koca, G., Akbulut, A., Erdem, O., ÇetiNkaya, S., Umurhan, G., Aydinbelge-DiZdar, N., Esmekaya, M., Yumuşak, N., Canseven Kurşun, A. G., & Korkmaz, M. (2023). The effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on apoptosis, neurodegeneration and trace element levels in the rat brain. *Anatolian Current Medical Journal*, 5(2), 102-110. <https://doi.org/10.38053/acmj.1245104>

- Carpenter, D. O. (2019). Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer : How source of funding affects results. *Environmental Research*, 178, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108688>
- Cevik, A., Aydin, M., Apaydin, A. M., & Yuksel, M. (2017). Pathological and immunohistochemical effects of electromagnetic fields on rat liver. *Indian Journal of Animal Research*, 6(3), 38-41. <https://doi.org/10.18805/ijar.B-765>
- Clavel, J., Goujon, S., Chevrier, C., & Jacquemin, B. (s. d.). *GEOCAP Birth—Environnement à la naissance et risque de cancer chez l'enfant*. 86.
- Coskun, O., & Comlekci, S. (2011). Effect of ELF electric field on some on biochemistry characters in the rat serum. *Toxicology and Industrial Health*, 27(4), 329-333. <https://doi.org/10.1177/0748233710387005>
- EMF-Portal. *EMF-Portal | Home*. Consulté 2 novembre 2023, à l'adresse <https://www.emf-portal.org/en>
- EMF-Portal. *EMF-Portal | Macro- and trace element concentrations in blood plasma and cerebrospinal fluid of dairy cows exposed to electric and magnetic fields*. (s. d.). Consulté 5 décembre 2023, à l'adresse <https://www.emf-portal.org/en/article/3642>
- EMF-Portal. *EMF-Portal | Progesterone concentrations during estrous cycle of dairy cows exposed to electric and magnetic fields*. (s. d.). Consulté 5 décembre 2023, à l'adresse <https://www.emf-portal.org/en/article/2400>
- Environmental Protection Agency. *Extremely Low Frequency Fields*. Consulté 20 octobre 2023, à l'adresse <https://www.epa.ie/environment-and-you/radiation/emf/what-is-emf/extremely-low-frequency-fields/#d.en.84461>
- Flodin, U., Seneby, A., & Tegenfeldt, C. (2000). Provocation of electric hypersensitivity under everyday conditions. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 26(2), 93-98. <https://doi.org/10.5271/sjweh.517>
- Frei, P., Poulsen, A. H., Mezei, G., Pedersen, C., Cronberg Salem, L., Johansen, C., Rössli, M., & Schüz, J. (2013). Residential distance to high-voltage power lines and risk of neurodegenerative diseases: A Danish population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 177(9), 970-978. <https://doi.org/10.1093/aje/kws334>
- Fullwood. *Manuel technique du M²erlin de Fullwood*. (s. d.). Consulté 18 octobre 2023, à l'adresse <https://docplayer.fr/113617873-Manuel-technique-du-m2erlin-de-fullwood.html>
- Guo, H., Kang, L., Qin, W., & Li, Y. (s. d.). Electromagnetic Radiation Exposure and Childhood Leukemia : Meta-Analysis and Systematic Review. *Alternative therapies*. 298 (55).
- Huss, A., Koeman, T., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2015). Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure and Parkinson's Disease—A Systematic Review and Meta-Analysis of the Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7348-7356. <https://doi.org/10.3390/ijerph120707348>
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). (2010). *Health Physics*, 99(6), 818-836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>

- International Workshop on Electromagnetic Field Hypersensitivity (2004 : Prague, C. R., Mild, K. H., Repacholi, M. H., Deventer, E. van, & World Health Organization. (2006). Electromagnetic hypersensitivity: Proceedings, International Workshop on Electromagnetic Field Hypersensitivity, Prague, Czech Republic, October 25-27, 2004 / editors, Kjell Hansson Mild, Mike Repacholi, Emilie van Deventer. *Proceedings, International Workshop on Electromagnetic Field Hypersensitivity, Prague, Czech Republic, October 25-27, 2004*. <https://iris.who.int/handle/10665/43435>
- Kheifets, L., Ahlbom, A., Crespi, C. M., Feychting, M., Johansen, C., Monroe, J., Murphy, M. F. G., Oksuzyan, S., Preston-Martin, S., Roman, E., Saito, T., Savitz, D., Schüz, J., Simpson, J., Swanson, J., Tynes, T., Verkasalo, P., & Mezei, G. (2010). A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. *American Journal of Epidemiology*, 172(7), 752-761. <https://doi.org/10.1093/aje/kwq181>
- Kolbabová, T., Pascal Malkemper, E., 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(1), 14206. <https://doi.org/10.1038/srep14206>
- La Clef des Champs. *Champs électromagnétique—La Clef des Champs, un site de RTE*. (s. d.). Consulté 18 octobre 2023, à l'adresse <https://www.clefdeschamps.info>
- Lai, H. (2021). Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 40(2), 264-273. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866>
- LATNEX. *MG-2000T: Triple Axis Pro EMF Meter*. (s. d.). Consulté 5 décembre 2023, à l'adresse <https://www.latnex.com/products/mg-2000t>
- Lee, J. M., Stormshak, F., Thompson, J. M., Hess, D. L., & Foster, D. L. (1995). Melatonin and puberty in female lambs exposed to EMF : A replicate study. *Bioelectromagnetics*, 16(2), 119-123. <https://doi.org/10.1002/bem.2250160208>
- Lee, J. M., Stormshak, F., Thompson, J. M., Thinesen, P., Painter, L. J., Olenchek, E. G., Hess, D. L., Forbes, R., & Foster, D. L. (1993). Melatonin secretion and puberty in female lambs exposed to environmental electric and magnetic fields. *Biology of Reproduction*, 49(4), 857-864. <https://doi.org/10.1095/biolreprod49.4.857>
- Mansourian, M., Marateb, H., & Vaseghi, G. (2016). The effect of extremely low-frequency magnetic field (50–60 Hz) exposure on spontaneous apoptosis : The results of a meta-analysis. *Advanced Biomedical Research*, 5(1), 141. <https://doi.org/10.4103/2277-9175.187375>
- Marino, A. A. (1999). *Applied Bioelectricity : From Electrical Stimulation to Electropathology*. J. Patrick Reilly. *The Quarterly Review of Biology*, 74(3), 371-371. <https://doi.org/10.1086/393243>
- Martin, F. B., Bender, A., Steuernagel, G., Robinson, R. A., Revsbech, R., Sorensen, D. K., Williamson, N., & Williams, A. (1986). Epidemiologic study of Holstein dairy cow performance and reproduction near a high-voltage direct-current powerline. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 19(3), 303-324. <https://doi.org/10.1080/15287398609530930>

- Ministères Écologie Énergie Territoires. *Champs électromagnétiques basses fréquences*. Consulté 18 octobre 2023, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/champs-electromagnetiques-basses-frequences>
- Nguyen, D. H., Richard, L., & Burchard, J. F. (2005a). Exposure chamber for determining the biological effects of electric and magnetic fields on dairy cows. *Bioelectromagnetics*, 26(2), 138-144. <https://doi.org/10.1002/bem.20084>
- Nguyen, D. H., Richard, L., & Burchard, J. F. (2005b). Exposure chamber for determining the biological effects of electric and magnetic fields on dairy cows. *Bioelectromagnetics*, 26(2), 138-144. <https://doi.org/10.1002/bem.20084>
- Portail Services RTE. *Courbes de consommation—RTE Portail Services*. Consulté 1 novembre 2023, à l'adresse <https://www.services-rte.com/fr/visualisez-les-donnees-publiees-par-rte/courbes-de-consommation.html>
- R. R: *The R Project for Statistical Computing*. (s. d.). Consulté 27 janvier 2024, à l'adresse <https://www.r-project.org/>
- Raleigh, R. J. (1988). *Joint HVDC Agricultural Study: Final Project Report, Executive Summary*. (DOE/BP-21216-4). Oregon State Univ., Union, OR (USA). Eastern Oregon Agricultural Research Center. <https://doi.org/10.2172/6378085>
- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Gallouin, F., & Roussel, S. (2009). Les courants électriques parasites en élevage. *INRAE Productions Animales*, 22(4), Article 4. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.4.3355>
- Rodriguez, M., Petitclerc, D., Burchard, J. F., Nguyen, D. H., & Block, E. (2004). Blood melatonin and prolactin concentrations in dairy cows exposed to 60 Hz electric and magnetic fields during 8 h photoperiods. *Bioelectromagnetics*, 25(7), 508-515. <https://doi.org/10.1002/bem.20024>
- Rodriguez, M., Petitclerc, D., Burchard, J. F., Nguyen, D. H., Block, E., & Downey, B. R. (2003). Responses of the estrous cycle in dairy cows exposed to electric and magnetic fields (60 Hz) during 8-h photoperiods. *Animal Reproduction Science*, 77(1-2), 11-20. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(02\)00273-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(02)00273-7)
- Roussel, J. *Cours d'électromagnétisme – femto-physique.fr*. 135, 62-68.
- Sakhnini, L., Al-Ghareeb, S., Khalil, S., Ahmed, R., Ameer, A. A., & Kamal, A. (2014). Effects of exposure to 50 Hz electromagnetic fields on Morris water-maze performance of prenatal and neonatal mice. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 15(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2013.05.004>
- Salvan, A., Ranucci, A., Lagorio, S., & Magnani, C. (2015). Childhood Leukemia and 50 Hz Magnetic Fields: Findings from the Italian SETIL Case-Control Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 2184-2204. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202184>
- Sermage-Faure, C., Demoury, C., Rudant, J., Goujon-Bellec, S., Guyot-Goubin, A., Deschamps, F., Hemon, D., & Clavel, J. (2013). Childhood leukaemia close to high-voltage power lines—The Geocap study, 2002-2007. *British Journal of Cancer*, 108(9), 1899-1906. <https://doi.org/10.1038/bjc.2013.128>

- Su, L., Zhao, C., Jin, Y., Lei, Y., Lu, L., & Chen, G. (2018). Association between parental occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and childhood nervous system tumors risk : A meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 642, 1406-1414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.142>
- World Health Organization. *Que sont les champs électromagnétiques ?* (s. d.). Consulté 18 octobre 2023, à l'adresse <https://www.who.int/fr/news-room/questions-and-answers/item/electromagnetic-fields>
- Wünsch-Filho, V., Pelissari, D. M., Barbieri, F. E., Sant'Anna, L., de Oliveira, C. T., de Mata, J. F., Tone, L. G., Lee, M. L. de M., de Andréa, M. L. M., Bruniera, P., Epelman, S., Filho, V. O., & Kheifets, L. (2011). Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in São Paulo, Brazil. *Cancer Epidemiology*, 35(6), 534-539. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2011.05.008>
- Wydorski, P. J., Kozłowska, W., Drzewiecka, E. M., Zmijewska, A., & Franczak, A. (2023). Extremely low-frequency electromagnetic field exposure alters DNA methylation levels in the endometrium of pigs during the peri-implantation period. *Reproduction, Fertility, and Development*, 35(12), 601-613. <https://doi.org/10.1071/RD22266>
- Zhou, H., Chen, G., Chen, C., Yu, Y., & Xu, Z. (2012). Association between extremely low-frequency electromagnetic fields occupations and amyotrophic lateral sclerosis : A meta-analysis. *PloS One*, 7(11), e48354. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048354>

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES EFFETS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE SUR LA QUALITE DU LAIT DES BOVINS

Auteur

RAVENEL Victor

Résumé

Les animaux de rente sont constamment exposés à des champs électromagnétiques dans leur environnement. En particulier en élevage laitier, les robots de traite comptent parmi les plus gros émetteurs de ces champs, ce qui pose la question d'éventuels effets sur la santé et la productivité animales.

Après une revue bibliographique des études qui caractérisent l'impact des champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence sur les êtres vivants, cette thèse s'intéresse, à travers une étude de terrain, aux conséquences sur les taux cellulaires de troupeau.

Mots-clés

Champ électromagnétique extrêmement basse fréquence, élevage laitier, robot de traite, cellules, bovins

Jury

Président du jury : **Pr BERTHEZENE Yves**

Directeur de thèse : **Pr MOUNIER Luc**

2ème assesseur : **Dr LEDOUX Dorothée**

Membre invité : **Dr VIN Hubert**