

IMPACTS ZOOTECHNIQUES ET SANITAIRES DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES EN ELEVAGE SUR LES BOVINS : APPROCHE FACTUELLE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

ALBESPY Marie

Née le 05/11/1993 à VILLEFRANCHE-DE-ROUERGUE (12)

Directeur de thèse : M. Didier RABOISSON

JURY

PRESIDENT :
M. Jean-Marc SOULAT

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Didier RABOISSON
M. Guillaume LHERMIE

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Directeur: Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie - Thérapeutique*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **PETIT Claude**, (Emérite) - *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 1° CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

PROFESSEURS 2° CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*

Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et Économie de la santé animale*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*
Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*
Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie - Analgésie*
Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*
Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
M. **LHERMIE Guillaume**, *Economie de la santé animale*
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*
Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

CHARGES D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS

M. **BOLON Pierrick**, *Production et pathologie aviaire*
M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*
Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*
Mme **TOUSSAIN Marion**, *Pathologie des équidés*

ENSEIGNANT DE PREMIERE ANNEE COMMUNE AUX ETUDES VETERINAIRES

Mme **GAUCHARD Cécile**, *Biologie-écologie-santé*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*

M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*

M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*

M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*

M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*

M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Jean-Marc Soulat

Professeur des Universités

Praticien hospitalier

Maladies professionnelles et environnementales

Qui nous fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Didier Raboisson

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Médecine des populations et économie de la santé animale

Pour m'avoir fait l'honneur d'être mon directeur de thèse.

Pour son soutien, ses conseils et sa confiance,

Toute ma reconnaissance.

A Monsieur le Docteur Guillaume Lhermie

Maitre de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Economie et Santé Animale

Qui a aimablement accepté de faire partie du jury de thèse

Mes sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	7
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION.....	15
PARTIE I: LES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES D'ORIGINE ANTHROPIQUE EN EXPLOITATION.....	17
A. QUELQUES BASES EN ELECTRICITE : NOTIONS DE COURANTS ELECTRIQUES ET CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	17
I. Courant électrique	17
1) Définition du courant électrique	17
2) Notions de conducteurs et d'isolants électriques	18
a) Conducteur	18
b) Isolant.....	18
c) Semi-conducteurs.....	19
d) Constitution d'un câble électrique	19
II. Différents types d'électricité	20
1) L'électricité statique.....	20
2) L'électricité dynamique.....	20
III. Le circuit électrique.....	21
IV. L'intensité du courant	21
1) Définition	21
2) Fusible ou coupe-circuit	22
3) L'interrupteur	22
4) Court-circuit	22
V. Tension électrique.....	23
1) Définition de la tension	23
2) Tension de rupture.....	23
a) Rupture d'un isolant gazeux.....	23
b) Rupture d'un isolant solide	24
c) Potentiel d'un point	24
d) Potentiel le long d'une résistance	24
VI. Résistance électrique	24
1) Définition de la résistance	24
2) Résistivité	25
3) Longueur du conducteur	25
4) Section	25
5) Température	25
6) La loi d'Ohm	25
VII. Les effets d'un courant électrique	26
1) Effet thermique ou calorifique	26
a) Chauffage	26
b) Eclairage.....	26
c) Protection des circuits électriques	26
2) Effet magnétique.....	27
3) Effet chimique	28

VIII.	<i>Notions de bases pour la sécurité d'une installation électrique</i>	29
1)	La phase	29
2)	Le neutre	29
3)	Le disjoncteur différentiel	29
4)	La terre	30
a)	La boucle de fond de fouille : à privilégier	31
b)	Prise de terre par piquets	31
5)	La masse	32
6)	Liaison équipotentielle	32
a)	Liaison équipotentielle principale	32
b)	Liaison équipotentielle locale	32
IX.	<i>Le transport et la distribution de l'électricité en France</i>	34
1)	Un réseau haute tension B (HTB)	34
2)	Un réseau haute tension A (HTA)	35
3)	Un réseau basse tension (BT)	35
X.	<i>Les champs causés par une circulation de courant électrique</i>	35
1)	Définition de la notion de champ	35
2)	Champ électrique : noté E	35
3)	Champ magnétique : noté H	36
4)	Champ électromagnétique	37
a)	Les ondes électromagnétiques	38
b)	Le spectre électromagnétique	40
B.	LES PHENOMENES ELECTRIQUES PRESENTS EN EXPLOITATION	42
I.	<i>Phénomènes électriques d'origine externe à l'exploitation</i>	42
1)	Phénomènes de couplage causés par les lignes électriques	42
a)	Induction électrostatique (= couplage capacitatif)	42
b)	Induction électromagnétique (= couplage inductif)	43
2)	Le couplage des prises de terre	44
3)	Les courants vagabonds	45
a)	Pertes électriques sur le réseau de distribution voisin	45
b)	Mise à la terre en utilisant une conduite d'eau	45
c)	Proximité de voies de chemin de fer	45
II.	<i>Phénomènes électriques d'origine internes à l'exploitation</i>	45
1)	Le couplage électrochimique (ou effet pile)	45
2)	Décharge électrostatique	46
3)	Les courants vagabonds	46
a)	Raccordements électriques et appareils défectueux	46
b)	Courants parasites issus de clôtures électriques	46
4)	Les perturbations électromagnétiques causées par des appareils électriques	48
a)	Création de courants parasites à haute fréquence	48
b)	Rayonnement	49
PARTIE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : IMPACTS ZOOTECHNIQUES ET SANITAIRES SUR LES BOVINS D'ELEVAGE		50
A.	NOTIONS D'EXPOSITION	51
I.	<i>Définition</i>	51
1)	Expositions	51
2)	Méthode d'évaluation de l'exposition	51
II.	<i>Exposition des animaux d'élevage aux champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence</i>	52
1)	Contexte de l'étude	52
2)	Matériel et méthode	52
3)	Résultats et conclusion	53
III.	<i>Exposition aux tensions</i>	54

1)	La tension de pas :.....	54
2)	La tension de contact	55
B.	NOTIONS DE SEUILS.....	55
I.	<i>Seuil de sensation</i>	55
II.	<i>Seuil de perception et notion de résistance corporelle</i>	56
1)	Définition seuil de perception	56
2)	Les points d'entrée et de sortie	56
3)	Trajet du courant dans l'animal	57
III.	<i>Seuil de nocivité</i>	59
C.	EFFETS SUR LES ANIMAUX.....	60
I.	<i>comportement</i>	60
1)	Orientation spatiale	60
2)	Comportement des bovins.....	60
a)	Effets des courants électriques parasites	60
b)	Effets des champs électromagnétiques.....	62
II.	<i>Impacts sur les performances zootechniques et impacts sanitaires</i>	63
1)	Effets des courants parasites	63
a)	Réponses physiologiques à un stress	63
b)	Sécrétion de cortisol.....	64
c)	Production laitière.....	64
d)	Mammites	67
e)	Fonction immunitaire.....	68
2)	Effets des champs électromagnétiques	69
a)	En conditions dites non contrôlées	69
b)	En milieux semi-contrôlés	69
c)	En milieu contrôlé	70
d)	Conclusion :	72
D.	MECANISMES PHYSIOPATHOLOGIQUES DES CEM	73
I.	<i>Effets sur les rythmes biologiques circadiens</i>	73
1)	Hypothèse de la mélatonine	73
2)	Hypothèse des cryptochromes.....	75
3)	Conclusion	75
II.	<i>Effets sur les canaux ioniques cellulaires des cellules excitables</i>	75
III.	<i>Effets des CEM sur l'ADN</i>	76
1)	Méta-analyses	76
2)	Effets sur les cellules en culture	77
3)	Etudes sur des animaux	77
4)	Conclusions	77
IV.	<i>CEM et stress oxydant</i>	78
V.	<i>CEM et impact sur l'immunité</i>	78
1)	Etudes in vitro	78
2)	Etudes in vivo	79
3)	Conclusion sur l'immunité.....	79
VI.	<i>Stress physiologique</i>	80
VII.	<i>Conclusion sur les mécanismes physiologiques</i>	80
E.	CONCLUSION ET DISCUSSION.....	81
PARTIE III : COMMENT MESURER LES PHENOMENES ELECTRIQUES PARASITES SUR LE TERRAIN ? COMMENT LES PREVENIR ?.....		82
A.	MESURES DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	82
B.	MESURES DES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES	82
I.	<i>Matériel</i>	83

II.	<i>Appareils de mesures</i>	83
1)	Mesures de tension en courant alternatif 50 Hz et en courant continu	83
2)	Mesures de courant alternatif 50 Hz.....	83
3)	Mesures de tensions impulsionnels ou de tensions avec une fréquence supérieure à 50 Hz	83
III.	<i>Méthodes</i>	84
1)	Mesures en courant	84
2)	Mesures en tension.....	84
3)	Points de mesures	85
a)	Tension de pas.....	85
b)	Tension de contact	85
4)	Quels courants parasites rechercher ?.....	86
IV.	<i>Interprétation des mesures</i>	86
1)	Courant alternatif de fréquence supérieure ou égale à 50 Hz	86
2)	Tensions impulsionnelles et courants continus	86
C.	CORRECTION DES ANOMALIES ELECTRIQUES RENCONTREES	87
I.	<i>Phénomènes d'origine externe à l'exploitation</i>	87
II.	<i>Phénomènes internes à l'exploitation</i>	87
1)	Décharge électrostatique.....	87
2)	Courant de fuite	87
3)	Effet pile	87
4)	Courants issus des clôtures électriques	88
	CONCLUSION	89
	BIBLIOGRAPHIE	91
	ANNEXES	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Visualisation du flux des électrons et du courant électrique.	18
Figure 2 : Composition d'un câble multiconducteur.	19
Figure 3 : Schéma d'un circuit électrique.	21
Figure 4 : Visualisation d'un champ magnétique (B) autour d'un fil conducteur dans lequel circule un courant (I).	27
Figure 5 : Effet chimique causé par la circulation d'un courant électrique dans une solution électrolytique.	28
Figure 6 : Conception des protections d'une installation électrique.	30
Figure 7 : Schématisation d'une prise de terre par piquets.	31
Figure 8 : Schéma de liaison équipotentielle dans un élevage de bovin.	32
Figure 9 : Techniques pour garantir une bonne continuité électrique.	33
Figure 10 : Schématisation du réseau de transport et de distribution de l'électricité en France.	34
Figure 11 : Schématisation des champs électrique et magnétique d'une lampe.	38
Figure 12 : Nature et propagation d'une onde électromagnétique.	39
Figure 13 : Spectre électromagnétique et les applications associées. (source INRS)	40
Figure 14 : Schématisation du couplage capacitif entre une ligne électrique (de champ électrique E) sur un abreuvoir métallique isolé du sol et interaction avec un bovin.	42
Figure 15 : Principe du couplage inductif dans une structure métallique et rôle de l'animal dans la boucle.	43
Figure 16 : Exemple de courant de boucle en exploitation au niveau d'un cornadis, non perçu par les animaux.	44
Figure 17 : Illustration du couplage électrochimique.	45
Figure 18 : Illustration du courant de retour d'une clôture électrique lorsqu'un animal entre en contact avec le fil.	47
Figure 19 : Exemple d'implantation d'un bâtiment et d'une clôture défectueuse.	48
Figure 20 : Schématisation d'une tension de pas chez un quadrupède.	54
Figure 21 : Schématisation d'une tension de contact chez un bovin.	55
Figure 22 : Schématisation de la résistance globale d'une vache laitière correspondant à un montage en série de la résistance de contact R_1 (entre l'abreuvoir et le mufle), de la résistance de l'animal (qui est fonction du trajet, RA/T) et de la résistance de contact R_2 (entre les sabots et le sol).	57
Figure 23 : Distribution de la résistance corporelle (en ohms, Ω) mesurée sur 28 vaches de race Holstein, selon le trajet emprunté par le courant : mufle-sabots, sabots avant, sabots arrière et trayon-sabots (d'après Norell et al 1983). L'étendue interquartile (\boxminus), la médiane ($—$), la moyenne (\bullet) et l'intervalle de confiance ($ $) sont représentés.	58
Figure 24 : Exemples de symptômes observables et de comportements que l'on peut retrouver lors de phénomènes électriques parasites.	61
Figure 25 : Mesure en courant.	84
Figure 26 : Mesure de tension entre le sol et l'abreuvoir en présence d'un animal.	84
Figure 27 : Mesure de tension de contact effective avec une résistance équivalente (tension entre le sol et l'abreuvoir, en l'absence d'animal).	85
Figure 28 : Mesure de tension présumée.	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse de l'ensemble des rayonnements sous forme de spectre électromagnétique. .	41
Tableau 2 : Résultats de l'étude de l'ANSES sur l'exposition aux CE et CM des bovins.	53
Tableau 3 : Seuils de perception du courant électriques mesurés chez la vache laitière en fonction de l'intensité (en mA) et du trajet parcouru par le courant électrique	59
Tableau 4 : Seuils et réactions de vaches laitières soumises à des intensités et des tensions différentes.	60
Tableau 5 : Augmentation de la fréquence cardiaque en fonction de l'intensité du courant électrique appliqué à des vaches laitières.....	63
Tableau 6 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur la production laitière (PL) et certains autres paramètres zootechniques mesurés chez la vache laitière.	64
Tableau 7 : Résultats d'études sur l'apparition de mammites suite à l'application de courant électrique.	68
Tableau 8 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les bovins, en conditions semi-contrôlées.	70
Tableau 9 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions contrôlées.	70
Tableau 10 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur les rythmes et le taux de mélatonine [d'après (Touitou et Selmaoui 2012)]	74

LISTE DES ABREVIATIONS

A : ampère

ADN : acide désoxyribonucléique

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

\vec{B} : champ d'induction magnétique

BT : basse tension

C : coulomb

c : célérité

CE : champ électrique

CEM-EBF : champ électromagnétique extrêmement basse fréquence

CNIEL : Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière

CM : champ magnétique

d : distance

E : énergie

F/f: fréquence

GPSE : Groupe Permanent pour la Sécurité Electrique

\vec{H} : champ magnétique

h : constante de Plank

HT : haute tension

Hz : hertz

I/i: intensité

IGF-1: insulin-like growth factor-1

J : joule

λ : longueur d'onde

μ : perméabilité magnétique

NK (lymphocyte) : natural killer

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Ω : ohm

PL : production laitière

Q/q : charge électrique

R : résistance

t : temps

T : tesla

T : période

TB : taux butyreux

THT : très haute tension

U/u : tension

V: volt

W : travail

INTRODUCTION

La presse professionnelle agricole contient de nombreux articles relatant de possibles effets de phénomènes électriques sur des animaux d'élevage. Impactant les performances zootechniques ou la santé des animaux, les conséquences de ces phénomènes amplifient le besoin de mieux les connaître afin de les prévenir. En effet, détecter et prouver l'existence de tels phénomènes s'avèrent complexes pour les éleveurs.

L'électricité est un phénomène connu depuis l'existence même de l'Humanité puisque sa première manifestation, la foudre, était déjà crainte par les premiers humains. Dans l'Antiquité, les phénomènes magnétiques avaient été constatés à travers la magnésite qui est un aimant naturel ou encore à travers le frottement de l'ambre jaune qui permettait d'attirer des objets et parfois d'engendrer des étincelles. C'est du nom de cette ambre jaune en grec « ἤλεκτρον » (elektron) que naît aux environs de 1600 après JC le terme « électricité ». Ainsi à partir du XVII^{ème} siècle, les phénomènes électriques commencent à être mieux décrits, ce qui permet d'arriver aux technologies que nous connaissons actuellement.

L'électricité a pris une place plus qu'essentielle dans nos quotidiens. L'évolution des exploitations agricoles d'autrefois à leur état actuel témoigne de la place prépondérante de l'électricité au cœur de celles-ci.

Ainsi, outre les évolutions techniques qu'apporte l'électricité au sein des élevages, elle peut aussi engendrer des phénomènes indésirés qui peuvent avoir des répercussions sur la santé des animaux. Or aujourd'hui, les équipements électriques sont présents au cœur des élevages (machines et robots de traite, distributeurs automatiques, panneaux photovoltaïques...) et paraissent souvent indispensables à leur fonctionnement.

Dans ce document seront traitées les deux interrogations suivantes : quels sont les différents phénomènes électriques parasites que l'on peut rencontrer en élevage et quels sont leurs effets sur les animaux et notamment les bovins ? L'objectif de ce document est donc de faire un état des lieux des données existantes dans la littérature, d'en évaluer leur validité pour enfin mettre en application les résultats obtenus dans la pratique clinique. Ce processus suit les étapes de l'« evidence based medicine ».

Ainsi pour aborder ce sujet, il faudra développer en premier lieu de nombreux paramètres physiques pour comprendre les bases de l'électricité. Seront ensuite explorés les phénomènes électriques d'origine anthropique présents en exploitation de bovins (les phénomènes d'origine naturelle tels que la foudre ne seront pas abordés). Une étude bibliographique traitera des données connues sur les impacts zotechniques et sanitaires sur les bovins d'élevage en suivant un processus de médecine factuelle comme évoqué précédemment. Seront enfin abordés en dernière partie des éléments de diagnostic de détection de courants parasites pour les éleveurs ou les vétérinaires.

PARTIE I : LES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES D'ORIGINE ANTHROPIQUE EN EXPLOITATION

A. QUELQUES BASES EN ELECTRICITE : NOTIONS DE COURANTS ELECTRIQUES ET CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Basée sur le regroupement d'informations contenues dans plusieurs documents¹, cette partie va servir à définir ou rappeler des notions utiles à la compréhension des phénomènes électriques. Cet état des lieux nous permettra ainsi de mieux cerner les phénomènes en élevage, leurs enjeux et les conséquences sur les animaux. Des informations complémentaires sont à retrouver en annexe 1 et un tableau qui résume les grandeurs évoquées ci-après en annexe 4.

I. COURANT ELECTRIQUE

1) Définition du courant électrique

Un courant électrique correspond à la circulation d'électrons dans un matériau. En effet, un matériau est composé d'atomes eux-mêmes constitués d'électrons de charge négative (noté $-Q$, exprimée en Coulomb C) en rotation autour d'un noyau chargé positivement. Le noyau contient lui des neutrons et protons dont les charges sont respectivement neutre (0) et positive (notée $+Q$). Habituellement, un atome

¹Cf Bibliographie

contient autant de charges positives que de charges négatives, le rendant ainsi neutre ($|-Q| = |+Q|$). Mais dans certains matériaux, des électrons arrivent à quitter un atome pour aller sur un autre atome. L'équilibre des charges est alors perturbé ce qui conduit à un flux de charges négatives causé par ce déplacement d'électrons de proche en proche entre les atomes d'un matériau. Ce flux représente le courant électrique. Conventionnellement, on représente le sens du mouvement des électrons en sens inverse de celui du courant électrique (figure 1).

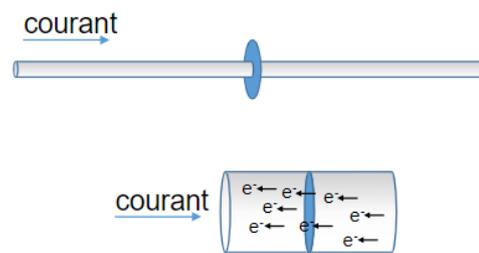


Figure 1 : Visualisation du flux des électrons et du courant électrique.

Source image : <https://fr.khanacademy.org/science/physics/circuits-topic/circuits-resistance/a/ee-voltage-and-current>

2) Notions de conducteurs et d'isolants électriques

a) Conducteur

Un conducteur est constitué d'atomes dont les électrons libres sont capables de se déplacer d'atomes en atomes ce qui permet la création d'un courant électrique.

L'or, le cuivre, l'argent entre autres métaux sont par exemple de bons conducteurs.

Il existe des mauvais conducteurs tels que le carbone ou encore le tungstène, dont les électrons sont très liés au noyau et ont donc du mal à se déplacer. Leur utilisation sera abordée ultérieurement. (cf Partie 1.A.VII.1) Effet thermique ou calorifique)

b) Isolant

Un isolant électrique possède des électrons mais ceux-ci n'ont pas la possibilité de circuler vers un autre atome car ils sont très fortement liés au noyau. L'isolant ne conduit donc pas le courant électrique et s'oppose à la circulation des électrons. Le caoutchouc synthétique, le verre, le plastique ou encore l'air sont des exemples d'isolants.

Toutefois, un isolant peut devenir conducteur s'il présente des impuretés ou encore s'il subit une tension électrique importante qui arrive à arracher ses électrons. On parle alors de claquage.

La qualité d'isolation d'un matériau peut également varier en fonction de nombreux paramètres tels que la température, l'humidité ou encore un effet mécanique qui va détériorer le matériau.

c) Semi-conducteurs

Ils se comportent plutôt comme des isolants mais peuvent parfois être conducteurs. On trouve notamment le silicium, utilisé dans la composition de Smartphones et ordinateurs entre autres.

d) Constitution d'un câble électrique

Un câble électrique est dit isolé ou monoconducteur lorsque celui-ci possède un matériau conducteur entouré d'un isolant ; alors qu'il est dit multiconducteur lorsque plusieurs conducteurs isolés sont assemblés dans une même gaine isolante (figure 2).

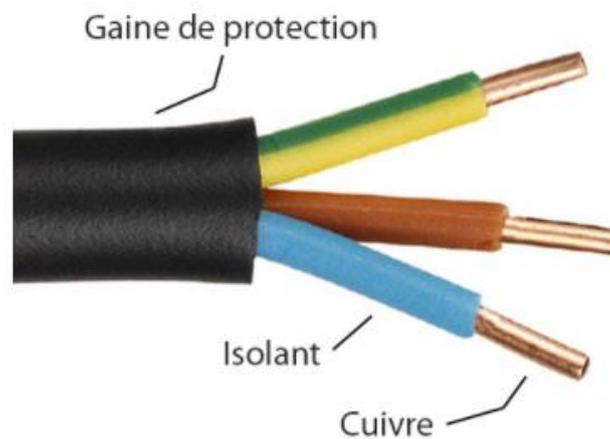


Figure 2 : Composition d'un câble multiconducteur.

Source image : <https://www.confort-electrique.fr/les-differents-types-cables-a-78.html>

II. DIFFERENTS TYPES D'ELECTRICITE

1) L'électricité statique

Frotter deux isolants l'un contre l'autre peut créer un mouvement d'électrons, c'est ce que l'on appelle l'électricité statique

Exemple : un peigne en ébonite et la fourrure d'un chat. Le peigne va mécaniquement arracher des électrons des poils qui vont alors s'accumuler dans le peigne. Les atomes des poils vont donc être de charge positive alors que ceux du peigne auront une charge négative. Pour redevenir neutre, le peigne va devoir perdre les électrons alors que les poils vont devoir en recevoir. On trouve donc à la surface de ces deux éléments des charges statiques de surface et donc on peut dire que les deux matériaux ont accumulé de l'électricité statique. Ainsi quand on rapproche le peigne des poils, ces derniers vont s'orienter vers le peigne car leur charge positive est attirée par la charge négative du peigne.

L'énergie emmagasinée reste faible et est peu utilisée au niveau industriel. Toutefois, ce type d'électricité peut être impliqué dans des phénomènes parasites.

2) L'électricité dynamique

A la différence de l'électricité statique où l'électricité est bloquée, l'électricité dynamique résulte du déplacement permanent des charges dans des conducteurs. Pour permettre ce déplacement permanent des charges, il faut un générateur qui va transformer l'énergie chimique (pile) ou mécanique en énergie électrique. Ainsi, le déplacement des électrons va pouvoir traverser un dispositif nommé récepteur qui va convertir l'énergie électrique en énergie lumineuse, énergie thermique ou énergie mécanique.

III. LE CIRCUIT ELECTRIQUE

Pour circuler, les électrons doivent réaliser un parcours qui rejoint les bornes négatives et les bornes positives du générateur en passant par des récepteurs. Chaque constituant du circuit présente des caractéristiques précises telles que les résistances (R), l'intensité du courant (I) et la tension du générateur (U) (figure 3). Ces notions seront abordées dans les parties suivantes.

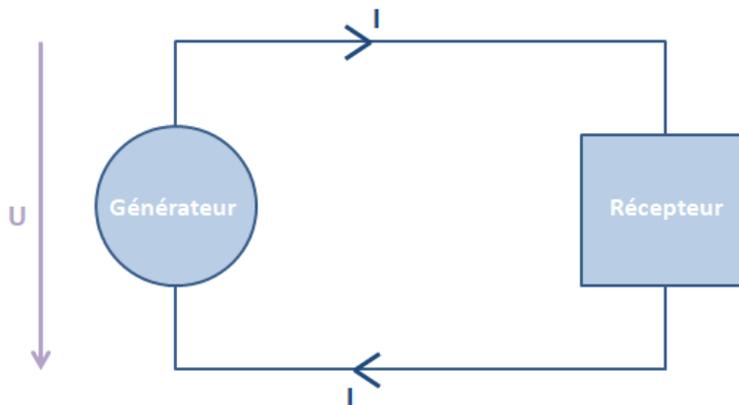


Figure 3 : Schéma d'un circuit électrique

Les fils qui conduisent le courant et relient les différents récepteurs sont repérés par des couleurs en relation avec leur fonction afin d'éviter des erreurs de conception. (cf Partie 1.A.VIII. Notions de base pour la sécurité d'une installation électrique).

IV. L'INTENSITE DU COURANT

1) Définition

L'intensité I, mesurée en ampère A, représente le nombre de charges (q) libérées par un générateur par seconde (t). Elle est traduite par la formule suivante :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

A partir d'une certaine intensité, les électrons vont se heurter et se frotter aux autres constituants du conducteur. Cette énergie va se traduire par une augmentation de la

température, que l'on nomme effet thermique (cf Partie 1.A.VII.1) Effet thermique ou calorifique).

2) Fusible ou coupe-circuit

Lorsque l'intensité risque de détériorer le circuit par effet thermique, le fusible ou le coupe circuit va permettre de couper de circuit. Cette coupure est réalisée par la fusion d'un matériau dont la section est inférieure à la section du circuit pour que l'effet thermique ne s'applique qu'au fusible. Les caractéristiques du fusible sont choisies en fonction du circuit à protéger par rapport à l'intensité qu'il va pouvoir supporter.

3) L'interrupteur

Pour couper volontairement un circuit, il faut séparer le conducteur de son générateur. Mais des précautions sont à prendre en compte. En effet, en séparant physiquement les deux bornes (+) et (-) du conducteur par un espace d'air, on va créer un phénomène appelé arc électrique. Les électrons du conducteur vont heurter violemment les molécules d'air présentes dans l'espace de la séparation. Elles vont alors se charger en électrons ce qui va créer comme un pont constitué d'air au niveau de la séparation. Or il y aura une forte résistance de cet espace ce qui va faire monter la température et ce qui va aussi augmenter les chocs entre atomes. On aura donc des jets de lumières et des radiations thermiques, ceci représente l'arc électrique. Ainsi, un interrupteur qui a pour objectif de couper le circuit va devoir limiter l'arc électrique.

4) Court-circuit

Un court-circuit survient quand, sur un circuit électrique, un conducteur relie deux autres conducteurs en shuntant un récepteur par exemple. Le conducteur ayant une résistance plus faible que le récepteur, l'intensité du courant va alors augmenter fortement. C'est à ce moment là qu'interviennent les fusibles qui vont entrer en fusion à cause de l'augmentation majeure de l'intensité et donc stopper la circulation des électrons pour protéger le circuit et l'installation électrique.

V. TENSION ELECTRIQUE

1) Définition de la tension

Un générateur électrique va permettre la circulation d'électrons dans un conducteur en concentrant des électrons à l'une de ses bornes. Cela crée donc un déséquilibre de charges que l'on appelle différence de potentiel. Cette notion est mesurable via une grandeur que l'on appelle la tension U qui s'exprime en volts V . En France, la tension aux bornes d'une prise de courant pour un courant alternatif est de 230 V . Pour un courant en continu comme une batterie, la tension est de 12 V .

Pour créer ce déséquilibre de charge, il faut dépenser de l'énergie (chimique ou mécanique, cf Annexe 1). L'énergie électrique notée E sortant du générateur est exprimée en Joules.

La tension dans un circuit entraîne une variation d'énergie potentielle électrique exprimée ainsi :

$$\Delta E_{pe} = q \times U$$

avec q représentant la charge. Un électron qui parcourt un circuit va libérer son énergie potentielle en fournissant du travail. L'électron va évoluer pour atteindre le niveau le plus bas en énergie. On traduit donc la tension entre deux points par l'équation suivante :

$$U = \frac{d E_{ep}}{dq}$$

qui représente la variation d'énergie potentielle électrique par unité de charge.

2) Tension de rupture

C'est la tension qu'il y a entre deux points non reliés par un conducteur mais qui ont chacun une telle différence de potentiel que les charges de ces deux points s'attirent entre elles. La distance entre ces deux points est insuffisante ce qui crée alors un arc électrique.

a) Rupture d'un isolant gazeux

Les électrons des conducteurs au niveau des deux points vont heurter violemment les atomes de l'air et va concourir au déplacement d'électrons. On l'appelle **courant**

de fuite, mais il ne se voit pas. Par contre, si on arrive à le visualiser, c'est que les électrons arrachés sont très nombreux et suffisants pour créer un **arc électrique**. C'est ce phénomène que l'on observe via les éclairs.

Une fois que l'équilibre électrique entre les deux points est rétabli, l'isolation permise par le gaz est reconstituée.

b) Rupture d'un isolant solide

Un isolant soumis à une tension très intense peut voir ses atomes perdre quelques électrons. De plus tout isolant présente des impuretés qui vont permettre malgré tout une conduction. D'un côté de l'isolant, on va avoir une accumulation d'électrons alors que de l'autre côté le générateur va accumuler des charges positives. A cause des impuretés, il va y avoir un passage des électrons, c'est le **courant de fuite**. Ce passage d'électrons peut laisser des traces dans l'isolant, on parle de rupture. C'est irréversible, ce qui implique que l'isolation ne se rétablira pas. C'est très dangereux car invisible.

c) Potentiel d'un point

Au cours du trajet dans un circuit électrique, les électrons voient leur énergie diminuer au fur et à mesure qu'ils traversent des récepteurs et être transformée en travail. Les électrons vont circuler du point au potentiel le plus élevé vers le point au potentiel le plus faible.

d) Potentiel le long d'une résistance

Le potentiel diminue de façon proportionnelle à la valeur de la résistance (la valeur de la résistance augmentant avec sa longueur). (cf ci après : VI) Résistance électrique)

VI. RESISTANCE ELECTRIQUE

1) Définition de la résistance

Lors du déplacement des charges négatives dans le conducteur et à travers des récepteurs, il y aura toujours une opposition à ce flux, c'est ce que l'on appelle la

résistance R. Le matériau a une résistance qui lui est propre en fonction des atomes qui le constituent, tout comme le générateur en lui-même. Cette résistance est traduite par une unité qui est l'Ohm (Ω). Cette résistance va donc faire varier la vitesse de déplacement des électrons ce qui correspond à une modification de l'intensité du courant. Cette résistance varie en fonction de la résistivité du matériau, de la longueur, de la section et de la température.

2) Résistivité

La composition du matériau est primordiale dans la définition de sa résistivité. En effet, si les atomes ont peu d'électrons susceptibles de se déplacer, il y aura donc opposition à la circulation du courant. On dit alors que la résistivité (notée ρ) augmente. Elle s'exprime en ohms mètres (Ωm).

3) Longueur du conducteur

La résistance électrique d'un conducteur est proportionnelle à sa longueur. Plus le conducteur est long, plus sa résistance augmente.

4) Section

La résistance électrique d'un conducteur est inversement proportionnelle à sa section. Plus la section est importante, plus sa résistance diminue.

5) Température

Plus les atomes vibrent dans le matériau, plus il y a production de chaleur. L'amplitude de vibration causent des impuretés dans le conducteur ce qui modifie la répartition des atomes en son sein. Ceci crée des obstacles aux mouvements des électrons et donc favorise l'augmentation de la résistance.

6) La loi d'Ohm

Elle exprime le lien entre l'intensité, la résistance et la tension. On obtient la formule suivante :

$$U = R \times I.$$

On constate que la valeur de la tension dépend de l'intensité du courant et de la résistance du matériau où le courant circule.

VII. LES EFFETS D'UN COURANT ELECTRIQUE

1) Effet thermique ou calorifique

Quand des électrons parcourent un conducteur qui présente une certaine résistance, ces derniers vont être ralentis par les noyaux constituant la matière. Il va y avoir échauffement (comme vu dans la partie sur la résistance) : c'est ce qu'on appelle l'effet Joule.

Quand on fournit de l'énergie électrique à un récepteur, on obtient la relation suivante traduisant l'énergie dissipée dans le temps t (en seconde) sous forme de chaleur exprimée en travail W (en joules) :

$$W = U \times I \times t.$$

En appliquant la loi d'Ohm $U = R \times I$, on obtient :

$$W = R \times I^2 \times t.$$

On voit donc bien le lien entre la chaleur produite traduite par W et la résistance du matériau.

Les applications de l'effet Joule sont les suivantes :

a) **Chauffage**

On utilise l'effet Joule en vue de produire de la chaleur. Exemple : radiateurs, grille-pain, plaques de cuisson...

b) **Eclairage**

L'effet Joule est exploité ici pour les lampes à incandescence dont le filament, constitué de mauvais conducteurs tels que le tungstène, va monter très haut en température. Ce rayonnement devient visible et permet la lumière.

c) **Protection des circuits électriques**

Comme vu précédemment dans la partie des fusibles, on utilise la résistance de certains matériaux pour protéger les circuits électriques en cas de hausse massive de l'intensité.

Pour ces applications, il y a une perte d'énergie à prendre en compte dans la mise en place de circuits électriques. Un danger lié à l'effet Joule est évidemment le risque de départ de feu suite à une augmentation trop importante de la température du circuit.

2) Effet magnétique

Une charge en mouvement dans un conducteur va créer un champ magnétique concentrique autour du fil du conducteur (figure 4).

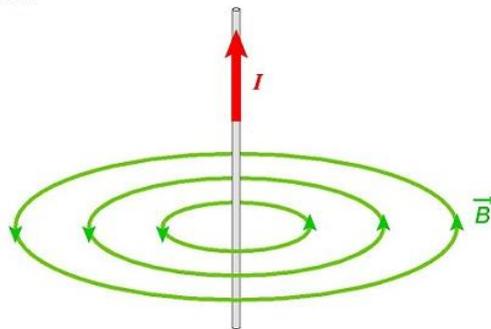


Figure 4 : Visualisation d'un champ magnétique (\vec{B}) autour d'un fil conducteur dans lequel circule un courant (\vec{I}).

Source image : <https://www.maxicours.com/se/cours/champ-magnetique/>

Pour son intensité, l'amplitude de ce champ magnétique est

$$\frac{\mu I}{2 \pi r} .$$

On voit que l'amplitude est donc inversement proportionnelle au rayon, c'est-à-dire que plus on s'éloigne du fil, plus l'amplitude du champ magnétique est faible.

μ est une constante appelée perméabilité magnétique du milieu dans lequel on se trouve. Dans l'air, on considère que μ_{air} est comme μ du vide, elle s'appelle μ_0 et vaut $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{mA}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ que l'on peut convertir en unité d'induction magnétique Tesla T soit : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$.

3) Effet chimique

On peut soumettre un courant électrique à une solution électrolytique en reliant un générateur à deux électrodes plongées dans la solution. Une électrode nommée anode est reliée à la borne positive du générateur alors que l'autre électrode appelée cathode est reliée à la borne négative.

Lorsque l'on branche le générateur, s'effectue alors une électrolyse : l'anode va se comporter comme un oxydant et va donc recevoir des électrons (phénomène de réduction) alors que la cathode va se comporter comme un réducteur en libérant des électrons auprès des ions de la solution (phénomène d'oxydation).

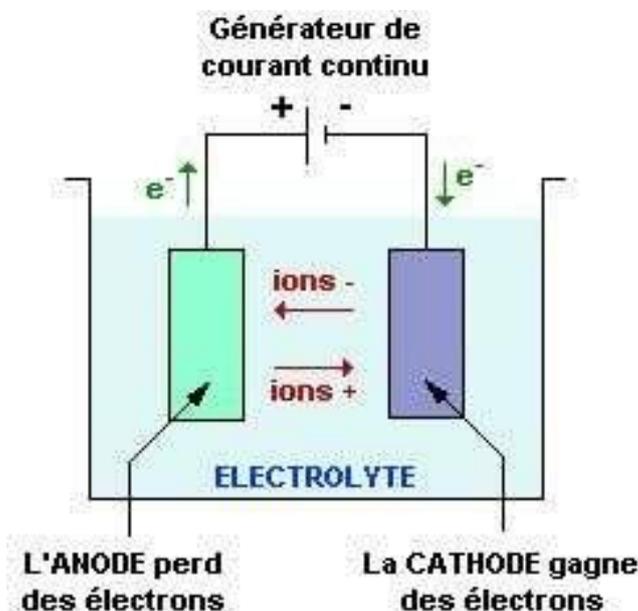


Figure 5 : Effet chimique causé par la circulation d'un courant électrique dans une solution électrolytique.

Source image : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-electrolyse-339/>

En inversant le phénomène, l'électrolyte va pouvoir générer un courant électrique. C'est cet effet qui est utilisé dans le cas des batteries ou piles (figure 5).

VIII. NOTIONS DE BASES POUR LA SECURITE D'UNE INSTALLATION ELECTRIQUE

Des éléments de base sont importants afin de garantir la sécurité d'une installation électrique.

Un document publié par le CNIEL en 2019 permet de donner des conseils aux éleveurs afin de minimiser voire éviter totalement certains incidents électriques lors de la construction ou rénovation de leur bâtiment d'élevage.

1) La phase

C'est le fil qui conduit le courant et doit être parfaitement isolé. Il est usuellement représenté en rouge.

2) Le neutre

C'est le fil qui permet le retour du courant et qui ferme donc le circuit. Il est représenté en bleu clair. L'isolation de ce fil est également primordiale.

3) Le disjoncteur différentiel

Un disjoncteur différentiel sert à protéger les circuits électriques des court-circuits, surcharges et fuites électriques. Il détecte la variation entre la quantité d'électricité émise et la quantité reçue à la fin du circuit. Si la différence est trop élevée (en négatif ou en positif), le disjoncteur coupe la circulation.

Une sensibilité leur est attribuée, elle correspond au seuil de déclenchement (coupure). On les place entre le disjoncteur général et le circuit à protéger.

Au sein d'une exploitation, il existe différents circuits principaux dont chacun est protégé par un système de protection composé soit de disjoncteurs soit de fusibles (figure 6).

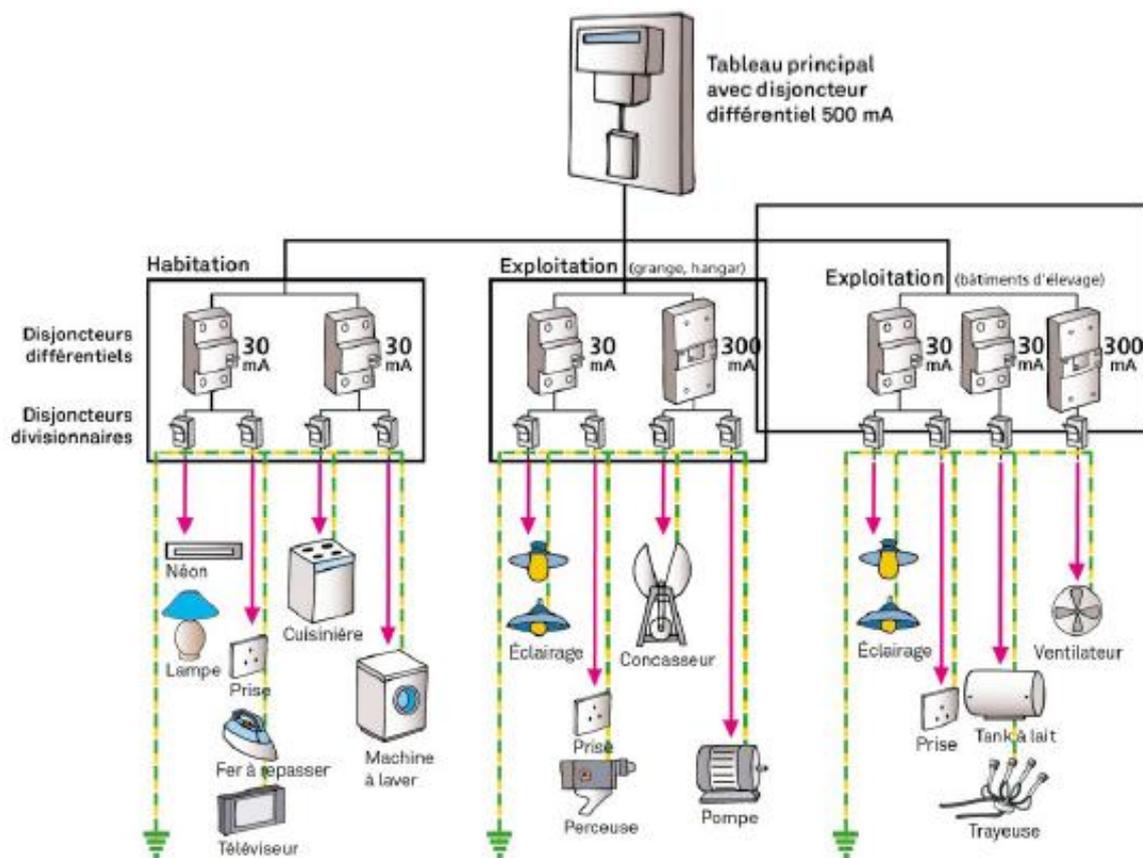


Figure 6 : Conception des protections d'une installation électrique.

Source : GPSE 2019

Ainsi, différentes sensibilités peuvent être appliquées au dispositif en fonction de l'objectif à assurer :

- pour la protection des personnes et des animaux, il est nécessaire que chaque section du tableau électrique soit protégée par un dispositif différentiel calibré à **30 mA**, ce qui correspond à l'intensité déterminée par la norme pour éviter tout risque électrique en environnement humide.
- pour éviter la détérioration des équipements électriques, le calibrage se fait plutôt sur une valeur de **300 mA**.

4) La terre

C'est un élément majeur de sécurité. Elle permet d'évacuer les fuites de courant et de couper le circuit. Le fil de la terre est matérialisé en jaune et vert.

Une valeur de résistance inférieure ou égale à 18 ohms est préconisée pour les élevages mais on cherchera à l'abaisser à moins de 10 ohms pour des structures avec des variateurs de fréquence comme les robots de traite. (CNIEL 2019)

Lors de sa réalisation il faut veiller à se tenir à plus de 25m d'une autre prise de terre (transformation, ligne électrique...) afin d'éviter un couplage (cf Partie B) 1) 2) Le couplage de prise de terre).

Les recommandations sont importantes à suivre pour n'importe quels éleveurs afin de garantir une sécurité électrique de son bâtiment. On trouve donc plusieurs solutions pour la mise à la terre :

a) La boucle de fond de fouille : à privilégier

Elle est composée d'un fil bon conducteur comme le cuivre nu avec une section de 25 mm² et doit être placée dans les fouilles du futur bâtiment. Sa profondeur correspondant à la profondeur des fouilles du bâtiment permet d'établir un bon contact avec le sol sans la nécessité de réaliser de gros travaux. (CNIEL 2019)

b) Prise de terre par piquets

Si le bâtiment est déjà construit, on peut améliorer la prise de terre existante par la création d'une autre prise de terre à relier à la terre existante. Cette installation est constituée de piquets généralement en acier galvanisé d'une taille de 2m minimum, espacés idéalement de 4m (minimum 2m) et reliés par un conducteur isolé de 16mm² de section ou un conducteur en cuivre d'au moins 25mm². Le fait de disposer plusieurs piquets permet de diminuer la résistance de la terre. (CNIEL 2019)

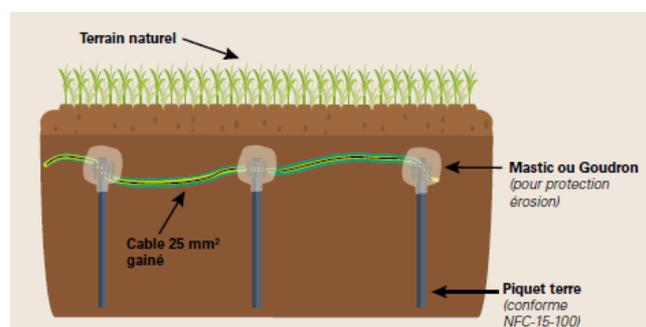


Figure 7 : Schématisation d'une prise de terre par piquets.

5) La masse

Elle correspond à toutes les parties métalliques des différents appareils électriques qui sont toutes reliées à la terre. Cela permet la protection des utilisateurs des appareils en cas de fuite de courant.

6) Liaison équipotentielle

Une liaison équipotentielle permet d'éviter les risques d'électrisation au sein d'une structure.

a) Liaison équipotentielle principale

C'est une protection permettant d'éviter la mise en place de potentiel électrique entre les différents éléments conducteurs. Elle relie à la terre les conducteurs métalliques tels que les canalisations conductrices (eau, gaz, poutrelle métallique, treillis métallique) au niveau d'une borne d'équipotentialité principale.

b) Liaison équipotentielle locale

Certaines zones dites à risques comme les pièces d'eau nécessitent une liaison équipotentielle supplémentaire afin de relier des éléments conducteurs tels que les sols à armature métallique à la prise de terre (figure 8).

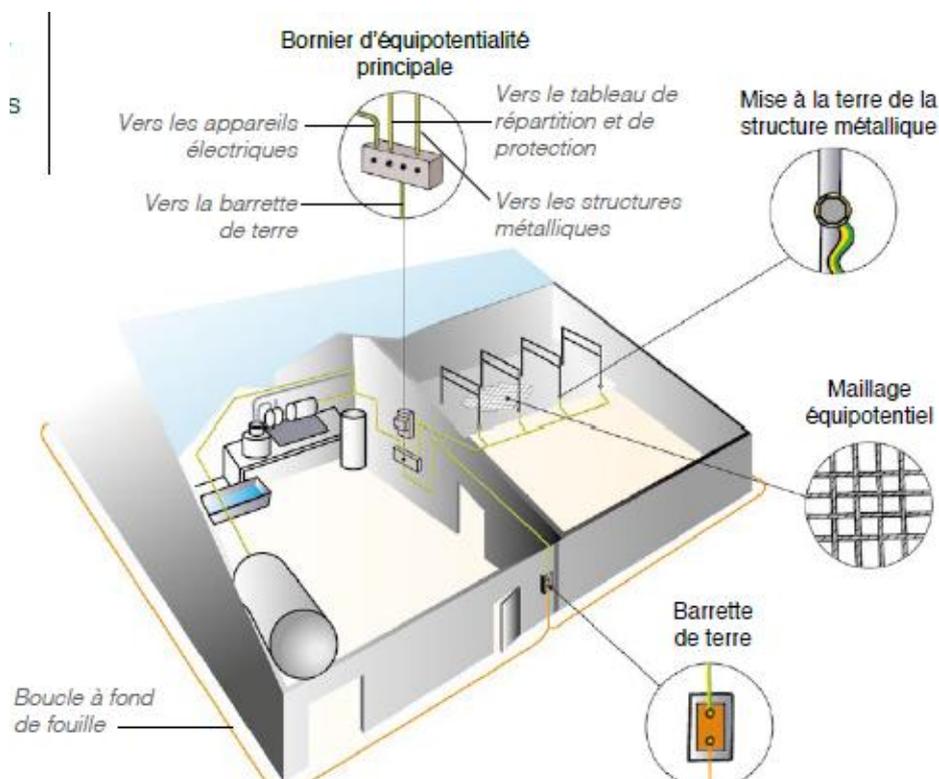


Figure 8 : Schéma de liaison équipotentielle dans un élevage de bovin.

Pour réaliser une bonne lésion équipotentielle, il faut ligaturer les treillis métalliques entre eux avant de couler le béton mais en plus, plusieurs méthodes peuvent être réalisées afin de garantir une bonne continuité électrique (figure 9) :

- Etablir une connexion par un pontet en laiton
- Réaliser une brasure au chalumeau, elle permet une très bonne conduction
- Faire une soudure à l'arc électrique ou soudure aluminothermique



Pontet en laiton



Cordon de soudure sur treillis



Soudure d'un poteau de charpente à la tresse de cuivre par aluminothermie



Détail de soudure par aluminothermie

Figure 9 : Techniques pour garantir une bonne continuité électrique.

IX. LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE

Entre la zone de production d'électricité et le consommateur, l'électricité doit être transportée et acheminée grâce à un réseau conducteur. Connaître la structuration du réseau électrique français est important pour comprendre certains phénomènes en exploitation (figure 10). Le réseau de distribution français est constitué de 3 réseaux :

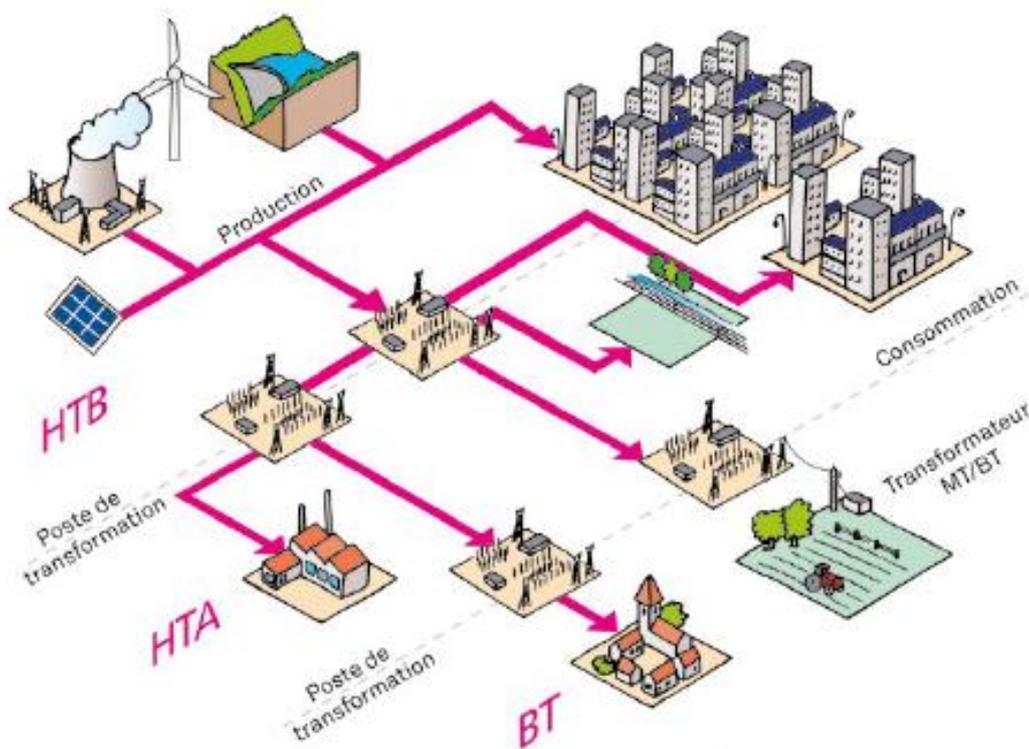


Figure 10 : Schématisation du réseau de transport et de distribution de l'électricité en France

Source : GPSE 2019

1) Un réseau haute tension B (HTB)

Ce réseau permet de distribuer le courant depuis les zones de production aux zones de consommation, pour ce type de réseau, la tension est supérieure à 50 000 volts.

2) Un réseau haute tension A (HTA)

Après passage dans des postes de transformation, la tension sera alors entre 1000 et 50 000 volts. Ce réseau permet de distribuer le courant vers les centres distributeurs et les grands clients industriels.

3) Un réseau basse tension (BT)

C'est le réseau qui permet l'acheminement au public en général.

C'est donc commun de voir des lignes qui permettent la transmission de l'électricité aux consommateurs traverser les campagnes et donc se trouver parfois à proximité d'animaux et de structures agricoles.

X. LES CHAMPS CAUSES PAR UNE CIRCULATION DE COURANT ELECTRIQUE

1) Définition de la notion de champ

Un champ correspond à : « un phénomène physique d'échange d'énergie et de forces qui s'exercent à distance provoquant des effets induits sur des objets. Il se caractérise par son intensité et sa direction. » Plus simplement, le champ désigne la « zone dans laquelle s'exerce le phénomène » (Raoul 2010).

Seront traités ici les champs électrique, magnétique et électromagnétique.

2) Champ électrique : noté \vec{E}

Un appareil branché, qu'il soit allumé ou éteint, va être mis sous tension. Il va alors produire un champ électrique que l'on mesure en volts par mètre (V/m). Plus on est proche de l'appareil, plus le champ électrique est fort. Un champ électrique représente un champ vectoriel des forces causé par les particules électriquement chargées. Cela conduit à une modification de l'espace. On la mesure en un point de l'espace par rapport à la distance de la charge électrique. Par exemple pour une charge notée Q en Coulombs , on aura une valeur de champ :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{d^2}$$

- ϵ représente la permittivité du matériau. C'est une constante exprimée en farads par mètre F/m. C'est le produit entre la permittivité dans le vide ϵ_0 qui vaut $8,854187 \times 10^{-12}$ F/m et de la permittivité relative ϵ qui varie en fonction du matériau. (ex : pour le vide elle vaut 1, pour le verre elle vaut 5).
- d représente la distance entre le lieu d'émission du champ et le point de mesure du champ. On constate alors que le champ décroît rapidement plus on s'éloigne de la source, à savoir $1/d^2$.

Un champ électrique peut mettre en mouvement des particules portant une charge si elles sont situées suffisamment proches de celui-ci. Il aura essentiellement des effets au niveau microscopique et non pas macroscopique.

Exemple :

- *champ électrique naturel à la surface de la terre : 100-150 V/m.*
- *en temps d'orage : 15-20 kV/m.*

Un champ électrique peut être statique s'il résulte de la circulation d'un courant dit continu. Mais il peut aussi être variable quand il provient d'un courant dit alternatif et variera donc en fonction de la fréquence de ce dernier.

3) Champ magnétique : noté \vec{H}

Comme expliqué précédemment (cf Partie I.A.VII.2) Effet magnétique), un champ magnétique apparaît uniquement lorsque des charges circulent. Il est mesuré en ampère par mètre (A/m) et est donc proportionnel à l'intensité du courant électrique.

$$H = \frac{I}{(2\pi d)}$$

- d correspond à la distance où l'on se trouve pour mesurer H par rapport au conducteur du courant.
- I caractérise l'intensité du courant

On parle plutôt pour H de champ d'aimantation.

Il existe aussi un champ noté \vec{B} qui décrit la densité de flux magnétique dans l'espace autrement appelée induction électromagnétique. On peut alors le nommer champ d'induction magnétique. On a alors la formule suivante :

$$H = \mu \times B$$

avec μ qui correspond à la perméabilité magnétique. Elle représente la capacité du milieu à modifier les lignes de flux magnétiques.

Le champ magnétique est mesuré en microtesla μT . On remarque que lui aussi diminue rapidement en fonction de la distance puisqu'on a un facteur de $1/d^3$.

Lorsqu'un courant continu circule, il crée un champ magnétique dit statique. Des appareils alimentés par pile ou batterie présentent ainsi un champ magnétique statique.

Exemple : Le champ magnétique terrestre est un champ statique et en France a une valeur de $50 \mu T$ (Raoul 2010).

En revanche, un courant alternatif va quant à lui engendrer un champ magnétique dit variable. Comme évoqué précédemment, ce courant va s'inverser au cours du temps en fonction de sa fréquence. Ainsi, pour une fréquence de 20 Hz par exemple, le champ magnétique va alors osciller autant que le courant à savoir 20 cycles par seconde.

4) Champ électromagnétique

Lorsque des charges circulent dans un matériau, va apparaître un champ dit électromagnétique. Celui-ci résulte de la conjugaison d'un champ électrique qui apparaît lorsqu'un appareil est mis sous tension et d'un champ magnétique qui apparaît lorsque le courant circule (figure 11).

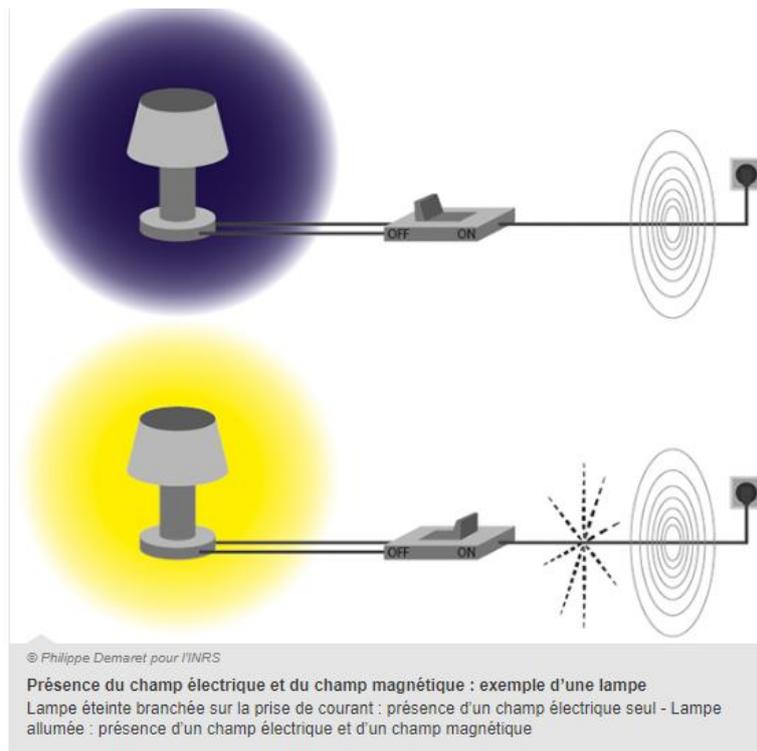


Figure 11 : Schématisation des champs électrique et magnétique d'une lampe.

Source image : <http://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/ce-qu-il-faut-retenir.html>

Ces champs sont des rayonnements dits non-ionisants car ils ne sont pas assez puissants pour arracher des électrons aux atomes environnants. Leur fréquence peut aller jusqu'à 300 GHz.

Les champs électrique et magnétique peuvent être statiques mais peuvent également varier au cours du temps. En effet, une oscillation peut être constatée dans le cas où les charges électriques oscillent également dans un circuit. Cette oscillation dans le temps est caractérisée par la grandeur suivante : la fréquence f . Ainsi, lorsque les champs sont variables, ils peuvent être représentés sous forme d'ondes qui se déplacent à la vitesse de la lumière.

a) Les ondes électromagnétiques

Les champs électrique et magnétique vont se propager via des phénomènes appelés « onde électromagnétique » de la manière suivante dans l'espace (figure 12).

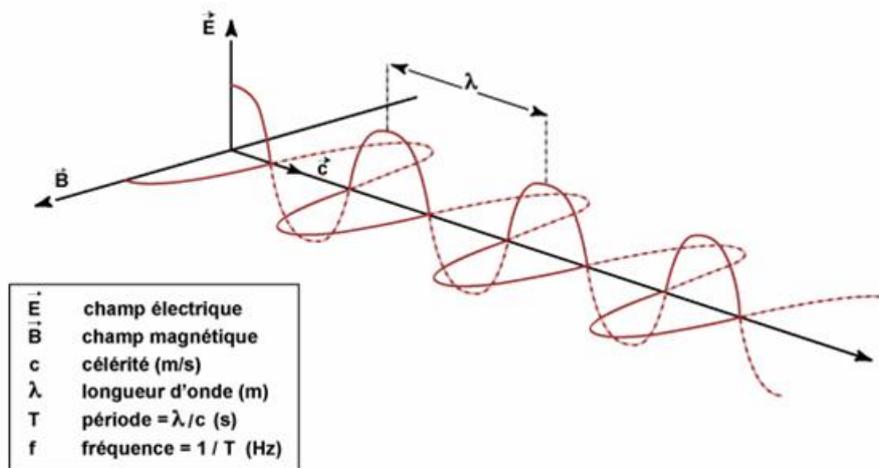


Figure 12 : Nature et propagation d'une onde électromagnétique.

Source image : D'après Bonn et Rochon, 1992

L'onde est définie grâce à plusieurs grandeurs :

- **La longueur d'onde λ** : c'est une distance qui représente la longueur d'un cycle d'une onde dans l'espace. Son unité est donc le mètre.
- **La période T** : c'est le temps qu'il faut pour qu'une onde réalise un cycle. On la mesure en seconde.
- **La fréquence f** : elle exprime le nombre de cycle par unité de temps, c'est l'inverse de la période. Son unité le hertz (Hz) correspond à une oscillation par seconde.

La longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence. On a $\lambda = \frac{c}{f}$ avec c qui représente la vitesse de la lumière qui vaut $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée.

Lorsque la fréquence est supérieure à 50 Hz, les champs électrique et magnétique s'unissent pour donner un *champ électromagnétique*. On parle alors d'onde ou de rayonnement électromagnétique. Plus la fréquence est grande et plus l'onde produite peut avoir des effets perturbants sur les appareillages électroniques sensibles, et ceci même pour des niveaux relativement faibles de champs.

b) Le spectre électromagnétique

Il correspond à la répartition des ondes en fonction de leur longueur d'onde. Cela permet donc de classer les ondes par énergie (cf figure 13).

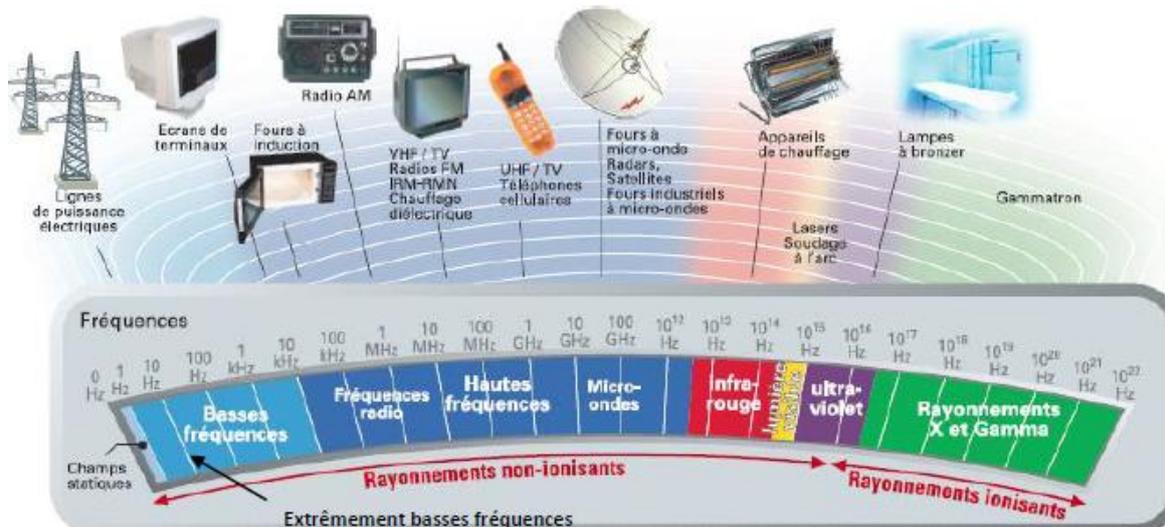


Figure 13 : Spectre électromagnétique et les applications associées. (source INRS)

On trouve alors deux types de rayonnements :

- Les rayonnements non ionisants dont l'énergie est insuffisante pour ioniser des atomes ou molécules, c'est-à-dire leur arracher des électrons
- Les rayonnements ionisants dont l'énergie est capable de créer des ions en arrachant des électrons.

Plus la fréquence augmente, plus l'énergie sera élevée. On a donc la relation mathématique suivante :

$$E = h \times f.$$

- E représente l'énergie de l'onde électromagnétique en joules J
- f représente la fréquence de l'onde en Hertz
- h est la constante de Planck exprimée en joules par seconde qui vaut $6.625 \cdot 10^{-34}$ J.s

On voit donc que si la fréquence augmente (ou que la longueur d'onde diminue), l'énergie sera plus grande que pour une onde avec une fréquence faible (ou une longueur d'onde élevée).

Rayonnement	Fréquence	Gamme	Exemples d'applications
Non Ionisant	0Hz	Champs statiques	Aimants, IRM
	3-300Hz	Extrêmement basses fréquences (EBF)	Réseau électrique et électroménager
	300 Hz à 30 kHz	Fréquences intermédiaires	Écrans vidéo, chauffage par induction
	30 kHz à 300 GHz	Radiofréquences	Radiodiffusion, télédiffusion, téléphone mobile, four à micro-ondes, radars, communications par Satellites
	300 THz à 385 THz	Infrarouge	Détecteurs antiviol, Télécommandes
	385 THz à 750 THz	Visible	Soleil, lasers
	750 THz à 3 PHz	Ultraviolet	Soleil, photothérapie
Ionisant	3 PHz à 30 PHz	Rayons X	Radiologie
	Au-delà de 30 PHz	Rayons gamma	Physique nucléaire
<small>k=kilo=10³, M=Méga=10⁶, G=Giga=10⁹, T=Téra=10¹², P=Péta=10¹⁵ Source : Fondation Santé et radio fréquences</small>			

Tableau 1 : Synthèse de l'ensemble des rayonnements sous forme de spectre électromagnétique.

Dans ce document, le spectre étudié sera celui des extrêmement basses fréquences dont les fréquences s'étendent de 3 à 300 Hz qui appartiennent aux rayonnements non ionisants. (source : fondation santé et radio fréquence) (tableau 1). Cela correspond aux moyens de communication, les appareils électriques ménagers et au transport de l'électricité. Des valeurs de champs électrique et magnétique d'équipements domestiques et d'élevage mais aussi pour des lignes électriques aériennes ont été mesurées et synthétisées (cf Annexe 3).

B. LES PHENOMENES ELECTRIQUES PRESENTS EN EXPLOITATION

Au sein d'une exploitation, de nombreux équipements électriques sont présents. Les conditions de leur branchement, leur utilisation et l'environnement dans lequel ils se trouvent peuvent favoriser l'existence de nuisances d'origine électrique. On peut alors établir une liste de phénomènes électriques que l'on peut y rencontrer.

I. PHENOMENES ELECTRIQUES D'ORIGINE EXTERNE A L'EXPLOITATION

1) Phénomènes de couplage causés par les lignes électriques

a) Induction électrostatique (= couplage capacitif)

Grâce au phénomène d'électricité statique (cf Partie I.A.II.1) L'électricité statique), un champ électrique va provoquer une différence de potentiel sur un objet métallique qui va dépendre de l'intensité du champ et de l'importance de la surface métallique. C'est ce que l'on appelle l'induction électrostatique ou couplage capacitif. En effet, un objet chargé électriquement que l'on rapproche d'un objet neutre va provoquer un déplacement des charges sur ce dernier (figure 14).

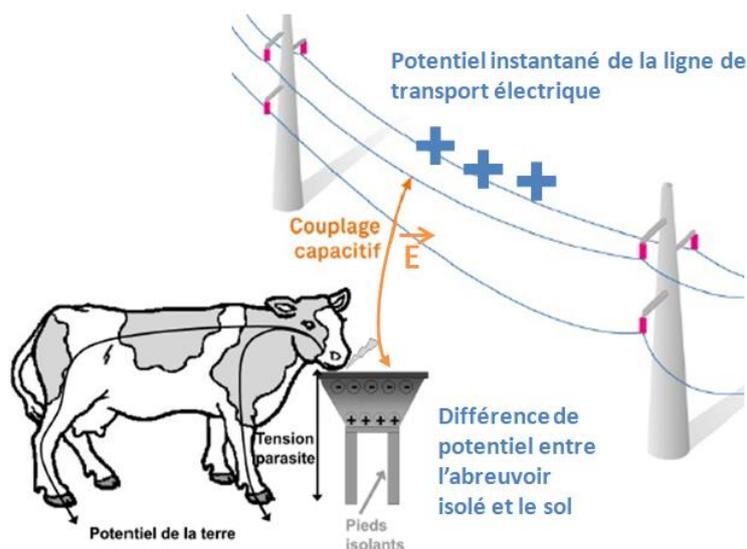


Figure 14 : Schématisation du couplage capacitif entre une ligne électrique (de champ électrique E) sur un abreuvoir métallique isolé du sol et interaction avec un bovin.

Image issue d'une image de (GPSE 2019) et d'une autre image de (Rigalma et al. 2009).

Exemple : un abreuvoir métallique **isolé du sol** et se situant à proximité d'une ligne HT ou THT va voir une modification de la distribution de ses charges. La surface de l'abreuvoir va accumuler ses charges mais lorsque l'animal va les toucher au moment de boire, celui-ci va servir de conducteur et va rediriger les charges vers le sol puisqu'il y aura une différence de potentiel entre la surface de l'abreuvoir et le sol.

b) Induction électromagnétique (= couplage inductif)

Quand on soumet un conducteur à un champ magnétique, l'induction magnétique va faire apparaître une force électromotrice grâce à un flux de champ magnétique variable. On parle de couplage inductif. Le courant va former une boucle entre les structures métalliques (figure 15). En effet, lorsque la boucle est fermée, l'induction va créer un courant dont l'intensité va dépendre de la résistance du matériel parcouru, alors que pour une boucle ouverte, l'induction va créer une différence de potentiel. Ainsi, pour un champ magnétique de 50 Hz et 10 μT , la tension induite sera de l'ordre de 3 mV.

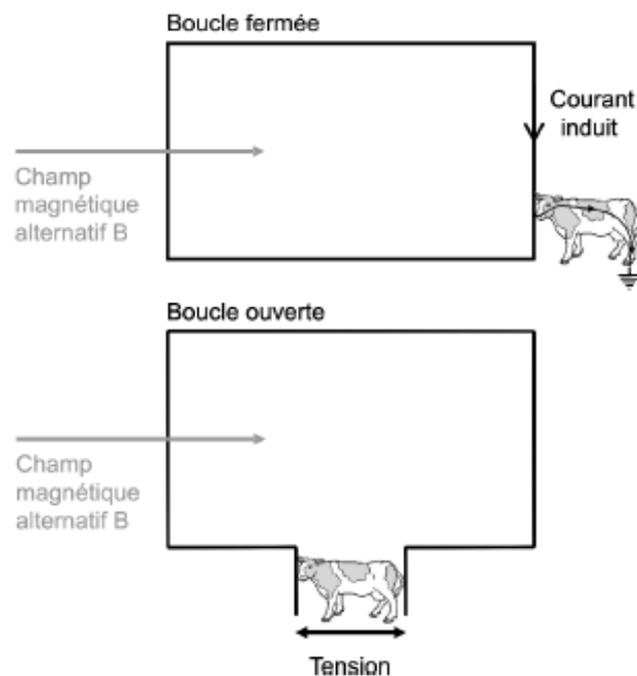


Figure 15 : Principe du couplage inductif dans une structure métallique et rôle de l'animal dans la boucle.

source : (Rigalma et al. 2009)

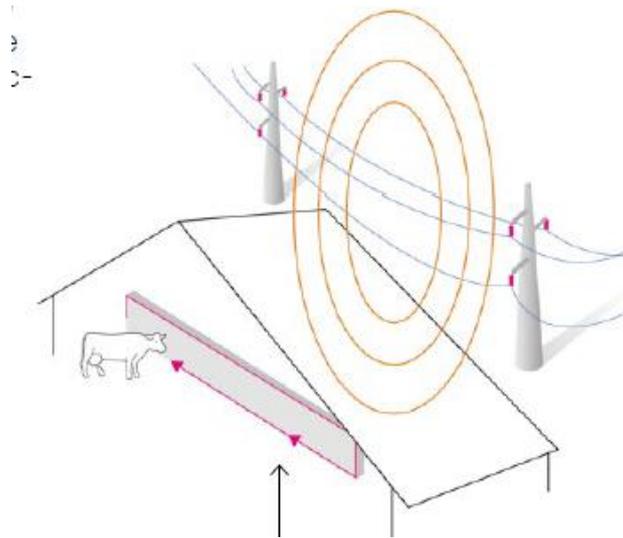


Figure 16 : Exemple de courant de boucle en exploitation au niveau d'un cornadis, non perçu par les animaux.

Source image :(GPSE 2019)

Par exemple, ici un bâtiment agricole se situe à proximité (moins de 250m) d'une ligne de 400 000 V. Le cornadis n'est soumis qu'au champ magnétique car la toiture représente un obstacle au champ électrique. L'induction magnétique va donc créer une tension générée le long du cornadis (figure 16). Cette tension de quelques millivolts est mesurable mais n'est pas perceptible par les animaux mais tourne dans le cornadis, c'est ce que l'on appelle courant de boucle (GPSE 2019).

2) Le couplage des prises de terre

Deux prises de terre qui seraient situées à une distance trop rapprochée l'une de l'autre (quelques mètres) comme par exemple celle d'un réseau haute tension et d'un réseau basse tension. Lorsqu'un courant parcourt la prise de terre du réseau haute tension, il peut alors entraîner une augmentation du potentiel du sol et donc de la terre du réseau basse tension se trouvant à proximité. Cela induit un danger pour les personnes et le matériel du réseau basse tension et des tensions parasites.

3) Les courants vagabonds

Des courants vagabonds peuvent circuler dans le sol et être perçus par les animaux.

a) **Pertes électriques sur le réseau de distribution voisin**

On peut rencontrer ces pertes lors d'une mise à la terre défectueuse des transformateurs qui vont regagner l'environnement électrique de l'exploitation.

b) **Mise à la terre en utilisant une conduite d'eau**

Le courant peut alors être renvoyé via l'eau au niveau de la structure émettrice et ainsi créer des perturbations.

c) **Proximité de voies de chemin de fer**

Les rails servent de chemin de retour pour le courant, donc si une mise à la terre d'une exploitation se trouve à proximité, il peut y avoir un couplage avec la mise à la terre de l'exploitation.

II. PHENOMENES ELECTRIQUES D'ORIGINE INTERNES A L'EXPLOITATION

1) Le couplage électrochimique (ou effet pile)

En agriculture, il est commun d'utiliser de l'engrais ou du lisier pour fertiliser les sols. Or, dans certaines conditions d'humidité, ces produits peuvent se comporter comme des électrolytes et créer un mouvement de charges dans le sol qui devient alors conducteur. Le sol et les métaux de l'exploitation vont alors se comporter comme une pile en créant des tensions mais aussi en favorisant la dégradation des objets métalliques enterrés par oxydation d'électrolyse (figure 17) (cf Annexe 1).

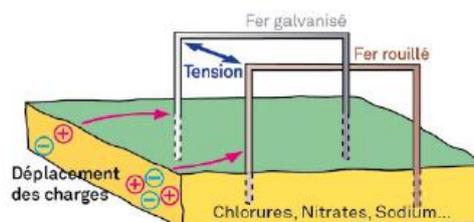


Figure 17 : Illustration du couplage électrochimique.

On peut trouver des tensions jusqu'à 1 ou 2 V entre les éléments métalliques (Rigalma et al. 2009).

2) Décharge électrostatique

Quand un matériau s'est chargé suite à des frottements par exemple (tapis roulant, courroies), il suffit qu'un conducteur tel qu'un animal le touche pour permettre l'évacuation des charges dans la terre (cf Partie A) II) 1) Electricité statique) Ce phénomène peut être semblable à une décharge mais peut aussi être beaucoup plus dangereux notamment s'il se trouve en présence de vapeurs ou poussières inflammables. On retrouve ce type de phénomène lorsque la mise à la terre est insuffisante, d'où l'importance de sa réalisation.

3) Les courants vagabonds

a) Raccordements électriques et appareils défectueux

La propagation du courant au sein d'une installation peut engendrer des tensions parasites notamment lorsque l'on rencontre des anomalies de raccordement (câblage médiocre...) ou des appareils électriques défectueux.

De plus, une mauvaise évacuation des pertes électriques peuvent engendrer les mêmes phénomènes, notamment lors de mauvaise mise à la terre.

b) Courants parasites issus de clôtures électriques

Les clôtures électriques sont des dispositifs utilisés couramment par les éleveurs afin de maintenir leurs animaux dans un espace défini. Leurs caractéristiques de fonctionnement peuvent avoir des conséquences sur l'environnement électriques d'un élevage. Il faut donc appréhender leur fonctionnement afin d'en comprendre les possibles conséquences à l'échelle d'un élevage.

Les clôtures électriques sont alimentées par une source en basse tension à savoir soit une prise de courant de 230 V, soit une batterie ou une pile que l'on peut appeler électrificateur.

Cet électrificateur produit des impulsions sous une tension élevée jusqu'à 12 000 volts, d'énergie faible inférieure à 5 joules et de fréquence maximale de 1 Hz.

Le fil de la clôture est relié à la borne positive tandis que la borne négative est reliée à une prise de terre. Ici, la prise de terre est constituée par la terre elle-même. Lorsqu'un animal entre en contact avec le fil, le courant traverse l'animal et retourne à la borne négative en passant par le sol (*figure 18*).

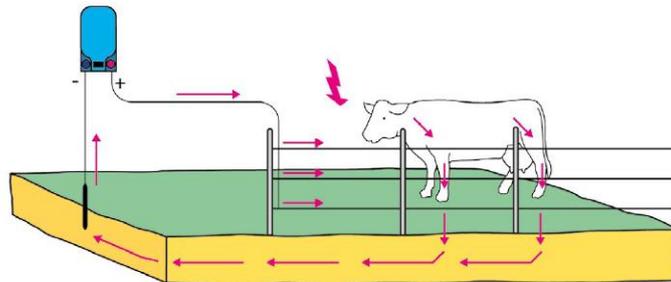


Figure 18 : Illustration du courant de retour d'une clôture électrique lorsqu'un animal entre en contact avec le fil.

Source image : GPSE 2019

La figure 18 illustre le parcours du courant qui retourne à l'électrificateur lorsqu'un animal touche le fil. On retrouve ce même phénomène si le long du fil une défaillance d'isolation est rencontrée. Le courant va fuir en permanence au niveau de la zone mal isolée (isolateur cassé, branche d'arbre en contact avec le fil...) et va aussi regagner le générateur.

Le courant retour peut présenter un risque lorsque son parcours traverse un bâtiment d'élevage ou la terre d'un bâtiment d'élevage (*figure 19*).

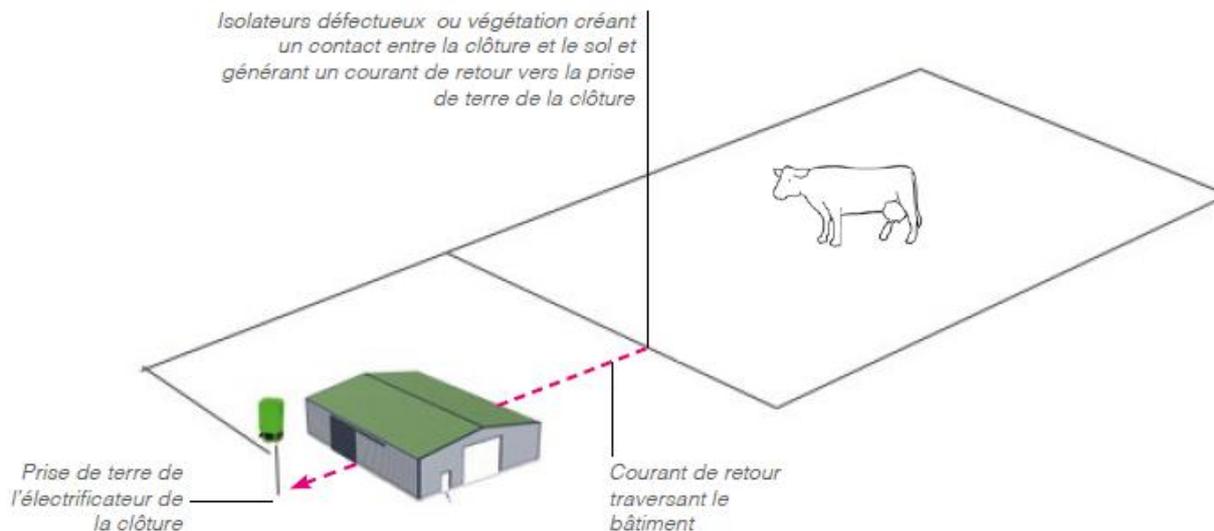


Figure 19 : Exemple d'implantation d'un bâtiment et d'une clôture défectueuse.

Source GPSE 2019

Sur la figure 19, la clôture présente une défaillance qui conduit à l'existence d'un courant de fuite qui retourne vers la prise de terre (borne négative de l'électrificateur). On constate que ce courant de fuite se rend à la terre en traversant le bâtiment. On comprend alors qu'à cause de ce courant retour, l'environnement électrique du bâtiment sera perturbé. Les tensions retrouvées dans les bâtiments sont toutefois bien inférieures à celle d'origine mais sont également non négligeables (quelques dizaines de volts) (GPSE 2019). Il y a alors création de courants parasites.

4) Les perturbations électromagnétiques causées par des appareils électriques

Certains appareils électriques à moteur peuvent parfois créer des courants électriques parasites (exemple : pompe à vide des machines à traire). Ils peuvent avoir les deux conséquences suivantes (GPSE 2019) :

a) Création de courants parasites à haute fréquence

Ceci va alors entraîner une perturbation de l'alimentation électrique des autres appareils.

b) Rayonnement

Le rayonnement de ces appareils peut avoir une action sur le fonctionnement d'appareils électriques sensibles (cartes électroniques de machine à traire ou de robot).

PARTIE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : IMPACTS ZOOTECNIQUES ET SANITAIRES SUR LES BOVINS D'ELEVAGE

Dans cette partie, nous allons faire le point sur les données relatives aux effets des phénomènes électriques parasites sur les animaux. Un processus de médecine basée sur les faits sera ainsi appliqué pour faire un état des lieux de ce qui fait office de preuves établies par des publications. Toutefois, les données publiées restent rares dans ce domaine, conduisant à avoir recours à peu de documents principaux.

Un rapport d'expertise collective rédigé par l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et le travail) et intitulée « Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques » a été publié en 2015 (ANSES 2015). En effet, l'ANSES a été saisie en février 2013 pour la réalisation d'un « approfondissement de l'expertise scientifique relative aux conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences (CEM-EBF) sur la santé animale et les performances zootechniques ». En effet, des recherches sur ce sujet sont plutôt rares alors que sont rapportés des troubles comportementaux ou des détériorations des performances zootechniques. Des données de littérature plus récentes sont aussi utilisées et des éléments issus de publications, sources de ce rapport, sont aussi mobilisées lorsque jugés nécessaire.

A. NOTIONS D'EXPOSITION

I. DEFINITION

1) Expositions

L'exposition caractérise l'intensité du rayonnement électromagnétique reçu.

Trois durées d'exposition ont été définies :

- Exposition dite « aigue » lorsque la durée est de quelques minutes à quelques heures
- Exposition dite « chronique » lorsque l'exposition est réalisée sur une grande partie ou toute partie de la vie d'un animal
- Exposition dite « semi-chronique » qui correspond à un intermédiaire entre les deux premiers, à savoir quelques jours à quelques mois.

2) Méthode d'évaluation de l'exposition

L'ANSES a constaté que peu de données existent sur les méthodes mais propose de transposer ce qui est déjà fait en humaine. En effet, deux méthodes permettent d'appréhender l'exposition de sujets :

- Le calcul de valeurs de champs, via 3 méthodes qui obtiennent des résultats homogènes et concordants
- Les mesures réelles effectuées à poste fixe ou des mesures individuelles avec des capteurs fixés aux animaux. Elles peuvent être prises en continu ou ponctuellement au cours de la journée.

II. EXPOSITION DES ANIMAUX D'ELEVAGE AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE

L'ANSES a réalisé une étude en France du 27 juin au 11 septembre 2014 sur la notion d'exposition des animaux d'élevage aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (CEM-EBF).

1) Contexte de l'étude

L'étude est partie du constat que peu de documents traitaient du niveau d'exposition des animaux à ces champs. L'objectif était donc de faire « un premier inventaire des niveaux de CEM-EBF dans des exploitations agricoles » en prenant en compte différentes productions et une localisation à proximité ou non de ligne à haute tension (HT) ou à très haute tension (THT). Les impacts sanitaire et zootechnique n'ont pas été évalués dans cette étude.

2) Matériel et méthode

30 exploitations ont été choisies. Parmi elles, on retrouve :

- 10 élevages de vaches laitières de troupeaux allant de 35 à 400 vaches
- 10 élevages naisseurs-engraisseurs en porc avec des troupeaux allant de 100 à 400 truies
- 9 exploitations de poules pondeuses (Agriculture Biologique, Label Rouge, en cage)
- 1 couvoir.

Sur ces 30 exploitations, la proximité de lignes HT ou THT est différente :

- 17 se trouvent à moins de 200m de lignes de transport d'électricité qui allaient de 63 à 400 kV
- 13 sont à l'écart de lignes.

Les mesures de CEM-EBF « ont été effectuées dans le cadre d'une convention de recherche et développement (CRD) passée entre l'ANSES et le Laboratoire Exem, accrédité COFRAC pour la mesure du champ magnétique basse fréquence ».

Les mesures réalisées ont été les suivantes :

- A l'extérieur et à l'intérieur des exploitations :

- Les champs magnétiques (CM) via l'appareil Narda EHP 50 C
- Les champs électriques (CE)
- A proximité d'appareils électriques : les valeurs maximales de CM (Narda EHP 50 C) et différentes valeurs en fonction de la distance d'éloignement pour une fréquence de 40 Hz à 10 Hz.
- Mesures continues sur des bovins : 1 ou 2 animaux ont porté un équipement EMDEX Lite avec des mesures sur 8 heures pour les élevages éloignés des lignes HT et THT et pendant 24h pour les autres.

3) Résultats et conclusion

	Sous une ou des lignes électriques		A l'écart de ligne électrique	
	CE V/m	CM μT	CE V/m	CM μT
Valeurs à l'extérieur des bâtiments	46-5060	0.01-7.59	0-14.5	0-0.19
Valeurs à l'intérieur des bâtiments	0.01-43	0-2.97		
Valeurs à proximité d'appareils électriques (30cm)		CM : 0.03-24.60 μT		
Valeurs mesurées sur les vaches (13 bovins)	Mesure pendant 24h 8 vaches CM ≤ 3.5 μT		Mesures pendant 8h par jour 5 vaches CM ≤ 0.1 μT	

Tableau 2 : Résultats de l'étude de l'ANSES sur l'exposition aux CE et CM des bovins.

On note ainsi (tableau 2) que les CE et CM diminuent lorsque l'on rentre à l'intérieur des bâtiments agricoles.

On remarque également que les animaux sont peu exposés aux CM puisque la valeur limite d'exposition recommandée pour le public est de 100 μT (Recommandation européenne RE 1999/519/CE).

Des appareils présents en élevage peuvent générer des CM mais ceux-ci sont en général éloignés des animaux. Leur valeur peut atteindre 25 μT ce qui s'approche des valeurs des appareils domestiques (cf Annexe 2).

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

III. EXPOSITION AUX TENSIONS

Outre une exposition directe via les champs électromagnétiques eux-mêmes, les bovins sont également exposés à des effets indirects caractérisés sous la forme de deux types de tensions qu'ils arrivent à percevoir à savoir: la tension de pas et la tension de contact.

1) La tension de pas :

Un bovin présente entre ses membres antérieurs et ses membres postérieurs une différence de potentiel qui augmente quand la distance entre ces deux points augmente (figure 20).

Ce phénomène est rencontré lorsque l'individu se trouve au voisinage d'une source de courant mais aussi lors du foudroiement.

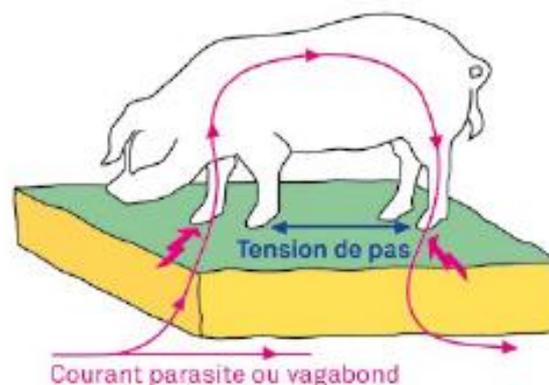


Figure 20 : Schématisation d'une tension de pas chez un quadrupède.

2) La tension de contact

Une tension de contact est susceptible de se créer entre un animal et un objet conducteur (cornadis, abreuvoir) qu'il touche ou lorsque l'animal touche 2 éléments conducteurs simultanément (tubulures en salle de traite) (figure 21).

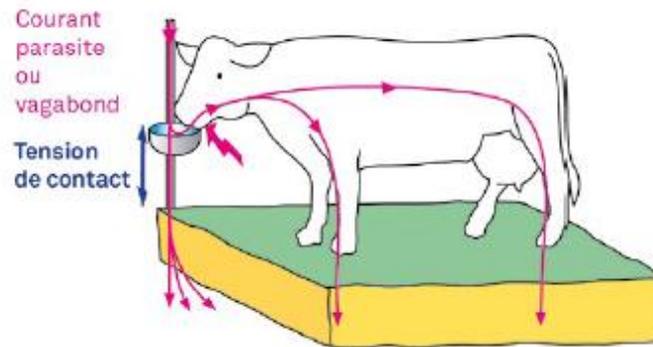


Figure 21 : Schématisation d'une tension de contact chez un bovin.

source image : GPSE 2019

B. NOTIONS DE SEUILS

Deux notions sont importantes à aborder, à savoir la notion de seuil de perturbation et de seuil de nocivité. Toutefois, il est important de comprendre que ce n'est pas parce que les phénomènes sont perçus qu'ils ont une conséquence néfaste sur les animaux.

I. SEUIL DE SENSATION

C'est le seuil à partir duquel l'animal a conscience de la présence du courant électrique mais cela ne provoque pas de réponse. C'est une grandeur non mesurable car non visible.

II. SEUIL DE PERCEPTION ET NOTION DE RESISTANCE CORPORELLE

1) Définition seuil de perception

Le seuil de perception est le seuil à partir duquel les animaux vont ressentir un stress et vont alors exprimer un changement comportemental et/ou physiologique. La réaction peut être ponctuelle, on parle alors de **seuil de réaction transitoire**, mais il peut aussi y avoir une réaction qui se maintient et se répète durablement, on parle alors de **seuil de réaction persistante**.

La réaction sera visible sans pour autant avoir une conséquence sur la production ou la santé et se manifeste sous différentes formes : nervosité, tremblement, horripilation (cf figure 24)... La circulation d'un courant de **1mA** dans le corps d'un animal correspond au **seuil de perception**, cela équivaut à une tension appliquée de **0,5 V** pour une impédance corporelle (résistance de l'animal) de **500 ohms**. (GPSE 2019)

Ce seuil varie en fonction des résistances corporelles qui sont dépendantes des espèces. Pour les bovins, la résistance corporelle moyenne d'une vache se trouve autour de 500 ohm mais oscille entre **200-900 Ω** (Rigalma et al. 2009). Cette valeur peut varier en fonction de plusieurs paramètres décrits ci-après.

2) Les points d'entrée et de sortie

En lien avec le trajet du courant, il a été constaté que la résistance interne des animaux ne représentait en réalité qu'une très faible portion de la résistance globale. En effet, il est important de prendre en compte la valeur de la résistance des points d'entrée et de sortie (figure 22).

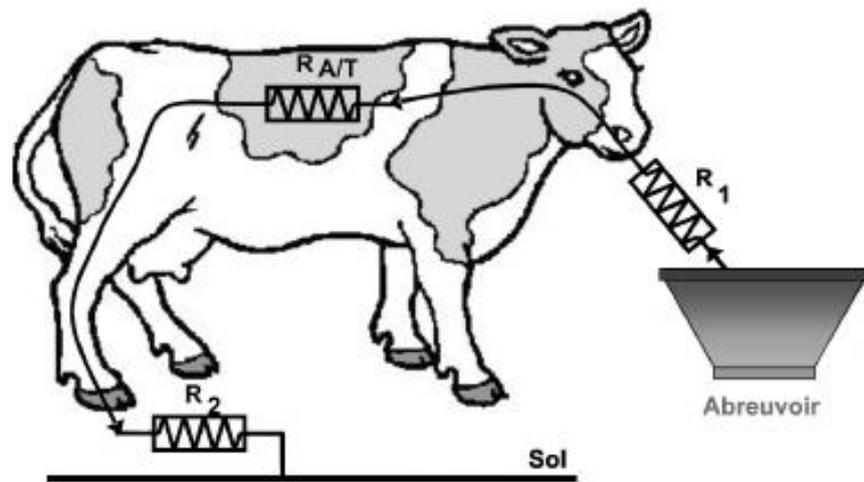


Figure 22 : Schématisation de la résistance globale d'une vache laitière correspondant à un montage en série de la résistance de contact R_1 (entre l'abreuvoir et le mufle), de la résistance de l'animal (qui est fonction du trajet, $R_{A/T}$) et de la résistance de contact R_2 (entre les sabots et le sol).

Source image: Rigalma et al 2009 mais d'après Bourget et al 2000

3) Trajet du courant dans l'animal

En fonction du trajet parcouru par le courant, la valeur de la résistance varie. Ainsi, Rigalma et al. (2009) ont établi une figure (figure 23) afin d'illustrer la variation possible entre différents trajets mais aussi entre individus à partir de l'étude de Norell et al. (1983).

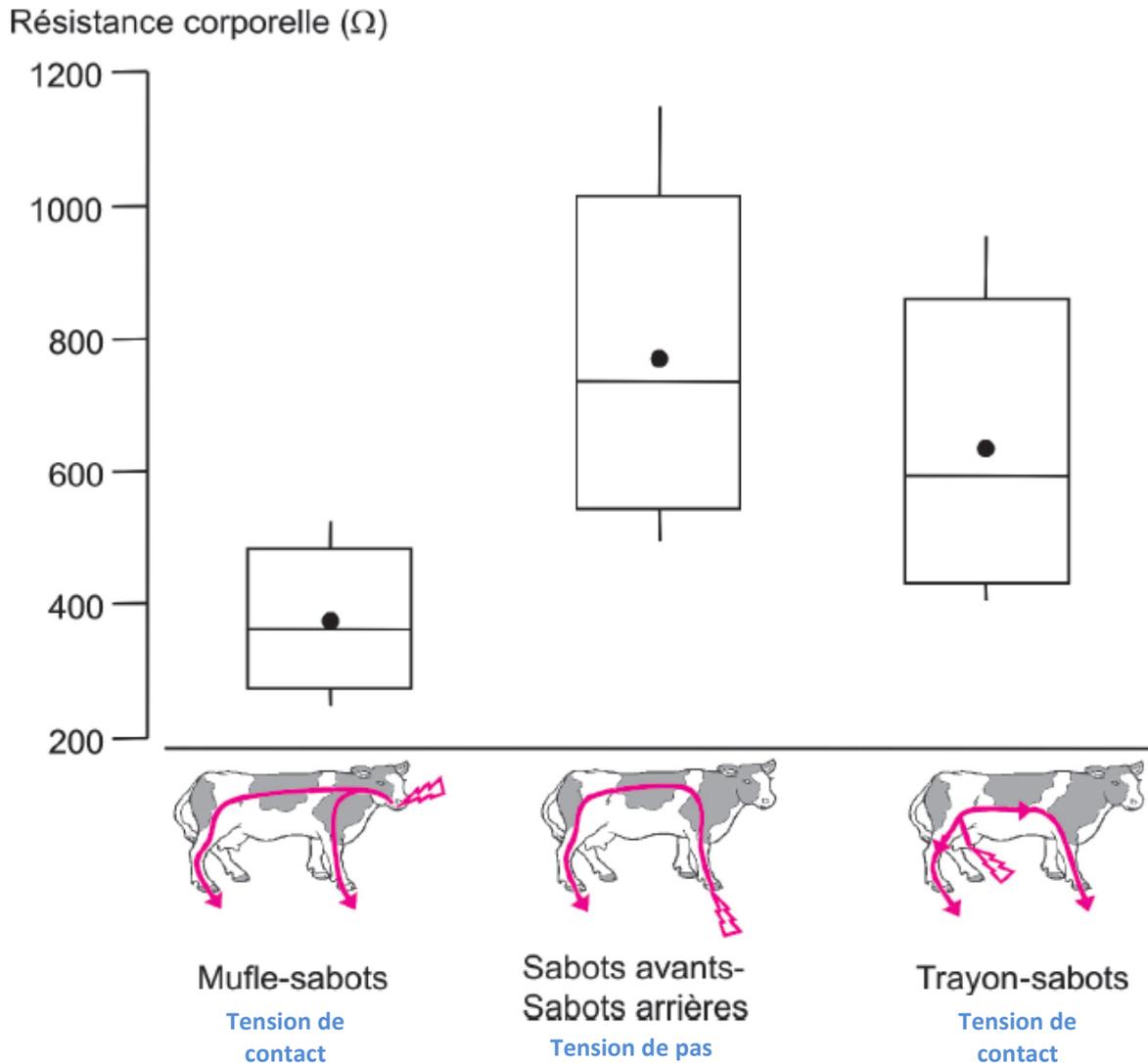


Figure 23 : Distribution de la résistance corporelle (en ohms, Ω) mesurée sur 28 vaches de race Holstein, selon le trajet emprunté par le courant : mufle-sabots, sabots avant-sabots arrières et trayon-sabots (d'après Norell et al 1983). L'étendue interquartile (\square), la médiane (—), la moyenne (•) et l'intervalle de confiance (|) sont représentés.

Source image : Rigalma et al 2009

Des différences de seuil de perception ont été constatées en fonction de l'intensité du courant et du trajet parcouru par le courant. Les valeurs restent assez variables entre les différents documents. (Tableau 3). On peut en conclure que la valeur seuil de perception peut varier entre 1 mA et 8 mA, soit une valeur de tension comprise entre 0.2V et 7.2V, pour des valeurs de résistance variant de 200 Ω à 900 Ω .

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

Tableau 3 : Seuils de perception du courant électriques mesurés chez la vache laitière en fonction de l'intensité (en mA) et du trajet parcouru par le courant électrique

Source : extrait de (ANSES 2015)

III. SEUIL DE NOCIVITE

Le seuil de nocivité est déterminé comme étant un seuil à partir duquel sont constatés une perturbation de la santé et/ou une altération de la production.

Des seuils ont été déterminés dans des fermes expérimentales mais n'ont pas été mesurée dans des conditions d'élevage réelles. Chez la vache, des valeurs d'intensités inférieures à 4 mA n'entraînent pas de baisse d'abreuvement ni de baisse de production. Cela correspond à des tensions de 2 à 4 volts, pour des résistances corporelles comprises entre 500 et 1 000 ohms soit une intensité variant entre 2 et 8 mA (GPSE 2019) (Erdreich *et al.* 2009).

Le document de Rigalma *et al.* (2009) résume dans un tableau les valeurs de seuils constatées (tableau 4)

Intensité (milliampères)	Tension (volts) ¹	Ce que ressent l'animal	Effets sur la production
De 0 à 1	De 0 à 0,5	Pas de perception	Aucun effet
De 1 à 4	De 0,5 à 2	Perception	
De 4 à 6	De 2 à 3	Sensation de sévérité modérée	Possible baisse de production
Au-delà de 6	Au-delà de 3	Sensation sévère susceptible de provoquer un changement physiologique	

Tableau 4 : Seuils et réactions de vaches laitières soumises à des intensités et des tensions différentes.

Source : GPSE 2019 mais extrait de Rigalma et al 2009.

C. EFFETS SUR LES ANIMAUX

Le document de l'ANSES cité précédemment a permis l'analyse et le regroupement de données relatives aux effets sur les animaux. Dans cette partie, seront alors synthétisés les résultats de ce document et mis en évidence ceux concernant les bovins.

I. COMPORTEMENT

1) Orientation spatiale

Le rôle de la sensibilité au champ électromagnétique terrestre de certains animaux en termes d'orientation dans l'espace et de retour sur un lieu habituel est connu depuis longtemps maintenant. Des mécanismes tels que la bio-accumulation de magnétite et l'activation de paires radicales des cryptochromes sont reconnus dans la transduction du CM. (pour les détails, cf ANSES 2015).

2) Comportement des bovins

a) Effets des courants électriques parasites

Les animaux soumis à des courants électriques parasites les perçoivent. Mais les signes observés sont malheureusement non pathognomoniques même si certains

d'entres eux peuvent orienter la suspicion vers la présence de phénomènes électriques parasites. Ainsi, des réactions comportementales sont visibles (figure 24).

Chez la vache

- Nervosité
- Tremblements
- Poil hérissé (horripilation)
- Réduction du temps passé au cornadis et consommation alimentaire insuffisante
- Réduction de l'abreuvement, vaches qui « lapent »
- Hésitation, refus d'entrer en salle de traite ou fuite en sortie
- Traites inégales
- Agitation en cours de traite, défécations
- Période de traite allongée
- Nombre élevé de cellules somatiques du lait
- Mammites chroniques

Figure 24 : Exemples de symptômes observables et de comportements que l'on peut retrouver lors de phénomènes électriques parasites.

Source : GPSE 2019

Erdreich et al. (2009) a mis en évidence plusieurs résultats :

- le comportement de l'animal ne se modifie pas tant que l'animal est exposé à une intensité de courant électrique inférieure à 2mA
- les vaches expriment du piétinement, des coups de pied, des sursauts pour des valeurs d'intensité comprises entre 2 et 8 mA.

Ces valeurs ont été confirmées par d'autres études tels que Rigalma et al. (2010) avec une valeur à 3.6 mA et à 7.2 mA par Reinemann et al. (2003).

Une seule étude a montré que pour un même trajet, on rencontre une forte variabilité de réponse comportementale, sans préciser sous quelle forme, en fonction des animaux (Lefcourt, et al. 1986). Une autre étude a montré que lorsque le courant circule entre le mufler et les membres antérieurs cela provoque une activité motrice plus importante que lorsqu'il est appliqué entre les membres antérieurs et les membres postérieurs (Reinemann et al. 2003).

Ont été constatées également des variations de seuil de réaction en fonction des états physiologiques (Aneshansley et al. 1992). Ainsi, les primipares avaient des seuils de réaction à 5mA alors que les multipares avaient un seuil de 8mA.

Au-delà de 8mA, peu de documentation existe et les résultats entre les études peuvent être contradictoires.

b) Effets des champs électromagnétiques

L'ANSES a constaté que l'état actuel des données ne permet pas de tirer des conclusions sur les essais terrains déjà réalisés. En effet, la diversité des intensités des champs, leur durée d'exposition ou encore les estimations de leur valeur ainsi que le manque de connaissance sur les animaux de rente rendent difficile l'établissement de conclusions.

Par exemple, des enquêtes ont confirmé que les bovins n'évitaient pas systématiquement les zones de pâturage situées sous les lignes électriques d'intensité faible (400 kV, 50 Hz)(Lefcourt et al. 1985) (Algers et al. 1981) ou plus importante (1100 kV, 60 Hz) (Rogers et al. 1984).

Des études ont montré que l'exposition sous des lignes n'ont pas modifié des comportements au pâturage des animaux ((Angell et al. 1990) (Raleigh 1988)) alors qu'une autre étude a mis en évidence que l'alignement spontané des animaux en fonction du champ magnétique terrestre disparaît sous les lignes THT (Burda et al. 2009).

La conclusion du groupe de travail de l'ANSES met en évidence que les données traitent surtout de modèles de rongeurs et non pas les animaux de rente. Ce sont donc des effets qu'il reste encore à déterminer.

II. IMPACTS SUR LES PERFORMANCES ZOOTECHNIQUES ET IMPACTS SANITAIRES

1) Effets des courants parasites

a) Réponses physiologiques à un stress

Le stress peut être traduit par une modification du taux sanguin de catécholamines (adrénaline et noradrénaline). Ces hormones régulent entre autres la fréquence cardiaque qui est une donnée facilement récoltable sur le terrain. Le stress peut également agir sur l'axe corticotrope via la sécrétion de cortisol.

La fréquence cardiaque :

Des essais ont mis en évidence une augmentation de la fréquence cardiaque en fonction de l'intensité du courant appliqué, ce qui correspond à une exposition aigüe. (Lefcourt et al. 1985 ; Lefcourt, Kahl, Akers 1986 ; Gorewitt et Scott 1986) (tableau 5)

Intensité appliquée	Lieu d'application	Durée d'exposition	Augmentation (battements /minutes)	Augmentation relative	Auteurs
3.6 mA	Entre la patte antérieure droite et la patte postérieure gauche, durant la traite	Choc électrique croissant pendant 10 secondes à chaque essai expérimental	+3	+4%	Lefcourt et al 1985, 1986
6 mA			+6	+8%	
10 mA			+17	+23%	
12.5 mA			+30	+40%	
4 mA	Dans la région lombaire	Avant et pendant la traite Pendant 10 secondes	+25	+33%	Gorewitt et Scott 1986

Tableau 5 : Augmentation de la fréquence cardiaque en fonction de l'intensité du courant électrique appliqué à des vaches laitières.

Sécrétion de catécholamines :

Les concentrations plasmatiques de noradrénaline et d'adrénaline chez des vaches laitières soumises à des courants de 2.5 mA à 12 mA, ayant pour parcours le membre antérieur droit et le membre postérieur droit, n'apparaissent pas modifiées (Lefcourt, Akers 1982 ; Lefcourt, Kahl, Akers 1986).

b) Sécrétion de cortisol

Le document de Drenkard et al. (1985) indique que la concentration plasmatique en cortisol a augmenté suite à l'application d'un courant de 8 mA entre la mamelle et les sabots chez la vache laitière. La moyenne du taux de cortisol pour le traitement se situe à 144.31 ng/mL alors pour les groupes témoins elle est autour de 96 ng/mL. Toutefois, cette augmentation ne semble pas systématique d'après Reinemann et al. (2003), suite à des mesures de courants de 3 à 5.25 mA entre les sabots antérieurs et postérieurs sur des vaches laitières.

De plus, ces valeurs doivent être prises avec prudence du fait de la pulsativité de la sécrétion du cortisol ainsi que sa variation au cours d'une journée.

c) Production laitière

Le groupe d'expert de l'ANSES a résumé, dans le tableau suivant (tableau 6), différents travaux traitant des effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur la production laitière entre autres paramètres.

Tableau 6 : Effets de l'exposition à des tensions électriques parasites sur la production laitière (PL) et certains autres paramètres zootechniques mesurés chez la vache laitière.

(source : ANSES 2015)

Effectifs d'animaux	Caractéristiques de l'exposition	Trajet parcouru par le courant	Modalités d'exposition	Durée d'exposition	Effets sur la production laitière	Références
6 (5 pour le courant intermittent) en début ou milieu de lactation	5 mA (60 Hz)	Électrodes posées sur zone rasée au dessus du jarret arrière et au dessus du genou avant	Continu et intermittent	Sur une seule traite, 10 min avant. Continu : pendant 20 min Intermittent: pendant 5 s toutes les 30 s.	continu: pas d'effet intermittent : effet significatif : diminution (p < 0,1)de -0.1 à -1.7 kg de lait	(Lefcourt et Akers 1982)
4 multipares et gestantes par groupe	0 et 4 mA	Sous cutané au niveau de l'épine dorsale; région lombaire	Pendant 30 sec toutes les min, durant 5 min	Toutes les 4 h pendant 4 jours consécutifs	Pas d'effet	(Gorewit et al. 1985)

6 multipares par groupe	0 ; 4 et 8 mA (60 Hz)	Mamelle - sabots	Pendant 5 s toutes les 30 s	Avant et pendant la traite, durant 7 jours	Pas d'effet	(Drenkard <i>et al.</i> 1985)
13 dont 7 primipares et 6 multipares	3,6 mA et 6 mA (60 Hz)	membres antérieurs – membres postérieurs	Pendant 5 s toutes les 30 s	7 jours (traite du matin et du soir)	Pas d'effet	(Lefcourt <i>et al.</i> 1985)
7 dont 1 primipare et dont 2 gestantes	0 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 10 et 12,5 mA (60 Hz)	Électrodes posées sur zone rasée au dessus du jarret arrière et au dessus du genou avant	Pendant 10 s	1h avant traite du matin, 2 fois/semaine	Pas d'effet	(Lefcourt <i>et al.</i> 1986)
6 multipares en fin de lactation	4 mA (60 Hz)	Région sacro-lombaire	10 s avant puis en continu pendant la traite	à la traite du matin, 6 jours	Pas d'effet	(Gorewit et Scott 1986)
30 par groupe (15 primipares et 15 multipares)	0 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 V	Mufle - sabots	Tension appliquée en continu aux abreuvoirs et tapis de sol	Durant 21 jours et après	Pas d'effet	(Gorewit <i>et al.</i> 1989)
40 multipares (10 par groupe) (RL = 2 à 5)	0 ; 1 ; 2 et 4 V*	Mufle – sabots avant	Tension appliquée en continu aux abreuvoirs placés sur une grille en métal	Lactation entière	Pas d'effet	(Gorewit <i>et al.</i> 1992a; Gorewit <i>et al.</i> 1992b)
15 dont 7 primipares et 8 multipares	5; 8 et 16 mA (60 Hz)	Extrémité des trayons – sabots arrières	Pendant la traite	6 traites consécutives	Pas d'effet	(Aneshansley <i>et al.</i> 1992)
32 vaches divisées en 4 groupes de 8 primipares et multipares	0 et 1 mA (60 Hz) et présence/absence phase de massage	Sabots avant – sabots arrière	Pendant la traite	sur une seule traite	Pas d'effet	(Reinemann <i>et al.</i> 2002)

16 vaches divisées en 4 groupes de 4 vaches	0 et 1 mA (60 Hz) et manchons trop âgés ou non	Sabots avant – sabots arrière	Pendant la traite	sur une seule traite	Courant : NS Défaut phase : NS Interaction : S. +2.2 kg de production laitière, débit moyen diminué de 0.3 kg/ min, débit maximal réduit de 1.2 kg/min, glissements des manchons 26 x plus.	
24 vaches par groupe	0 et 1 mA (60 Hz)	Sabots avant – sabots arrière	Pendant la traite	sur une seule traite	NS	
4 vaches par groupe	4 groupes : 0, R, R + 1,5 mA, R + 3 mA 2 groupes : 0, R x 1,5 mA	Mufle-sabots	Toutes les secondes, à l'abreuvement, durant 24 h	21 jours consécutifs si courant autour de R (4,9 à 9,5 mA RMS)	NS pour tous les groupes sur 21 j ; S sur 1ère semaine si courant R+3 ou Rx1,5 (6,2 à 11 mA RMS)	(Reinemann <i>et al.</i> 2005)
			Permanent		NS	
74	1,8 V; 3,6 mA	Abreuvoir	Aléatoire (36 h/semaine)	8 semaines	NS	(Rigalma <i>et al.</i> 2010)

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

PL = production laitière; RL = rang de lactation; TP = taux protéique; TB = taux butyreux; NS = non significatif ; R = niveau de courant (mA) créant une réponse comportementale ;

MSI = matière sèche ingérée ; RMS : root mean square (valeur efficace).

Plusieurs éléments peuvent ainsi être remarqués :

- Les conditions d'expérimentation sont très maîtrisées et ne reflètent ainsi pas les conditions d'élevage
- La plupart des études indiquent que les courants parasites n'induisent pas d'effet sur la production laitière mais les modalités des études sont également très variables d'une étude à l'autre, ce qui rend difficile une comparaison et donc une conclusion commune
- Mise à part l'étude de Gorewit et al dont l'évaluation a été réalisée sur une lactation entière, les autres ont été réalisés sur une période trop courte et sur un nombre trop restreint d'animaux pour avoir des résultats significatifs.

Une méta-analyse d'Erdreich et al. (2009), basée sur l'analyse d'études expérimentales et une étude de terrain, indique également que pour des expositions à des courants de 3mA ou moins sur une durée de 3 à 4 semaines, la qualité et la quantité de production de lait n'a pas été impactée. Les résultats montrent que les réponses comportementales de la plupart des vaches se situent entre 3 et 8 mA pour une fréquence de 60 Hz. Les résultats montrent également un effet seuil cohérent malgré les différences de conception des études.

Toutefois, Lefcourt, Akers (1982) ont mis en évidence une diminution de la production laitière (-12%) et de la durée de traite (-51 s) sans modifications des concentrations plasmatiques en ocytocine et catécholamines lors de l'application de courant de 5mA lors d'une traite. Cependant, l'échantillon d'animaux est trop faible pour être représentatif.

d) Mammites

Les courants électriques parasites semblaient augmenter l'apparition de mammites d'après les observations faites sur le terrain (Kirk, Reese, Bartlett 1984 ; Wilson, Southwick, Kaeser 1996). Toutefois aucune étude n'a confirmé ces remarques en milieu expérimental (Gorewit et al. 1989 ; Gorewit et al. 1992a ; Gorewit et al. 1992 ; Lefcourt et al. 1985 ; Rigalma et al. 2010 ; Southwick, Wilson, Sears 1992) (tableau 7).

			Apparition mammites
Choc électrique de 5s puis 25s de pause	Pendant chaque traite	3.6 mA	
	Pendant 7 jours	6.0 mA	
			<i>Lefcourt et al. 1985</i>
Tension aux abreuvoirs	En continu Pendant 21 jours	0 V	
		0.5 V	
		1.2 V	
			<i>Gorewit et al. 1989</i>
Tension aux abreuvoirs	Sur une lactation entière	4 V	
		0 V	
		1 V	
		2 V	
			<i>Gorewit et al. 1992a</i>
			<i>Gorewit et al. 1992b</i>
Tension aux abreuvoirs	Pendant 8 semaines	4 V	
		1.8 V	
			<i>Rigalma et al. 2010</i>
« waterline and cow platform »	2 semaines avec		
	2 semaines sans	0-1.8 V	
	Pendant 12 semaines au total	3.6-4.9 mA	
			<i>Southwick et al. 1992</i>

Tableau 7 : Résultats d'études sur l'apparition de mammites suite à l'application de courant électrique.

e) Fonction immunitaire

Reinemann et al (1999) ont effectué un test sur un total de 24 vaches laitières dont 12 vaches soumises à un courant de 1mA et 60 Hz pendant 2 semaines sur des cycles de 20 minutes (10 minutes d'application, 10 minutes de pause) dont le parcours a été des sabots avant vers les sabots arrières comparées à 12 vaches témoins. Treize paramètres de la fonction immunitaires tels que les mesures de la blastogénèse lymphocytaire, le burst oxydatif ou la production d'interleukines ont été mesurés et analysés. Il a été démontré qu'il n'y a pas eu de différences significatives de ces mesures entre le lot test et le lot témoin, ce qui suggèrent que l'exposition à un courant de 1 mA pendant 2 semaines n'a pas d'effet significatif sur la fonction immunitaire des bovins.

Toutefois, on peut constater que l'échantillon d'animaux et la durée d'exposition aiguë et de mesure restent faibles.

2) Effets des champs électromagnétiques

a) En conditions dites non contrôlées

Les études réalisées à base d'enquêtes faites sur des exploitations et d'études de cohortes de troupeaux, dont les conditions d'élevage ne sont pas prédéfinies ni contrôlées (CEM non contrôlés et variables), ne mettent pas en évidence d'effet distinctif des champs des lignes électriques sur des paramètres tels que le comportement, la fertilité, la production laitière entre autres.(Algers, Hennichs 1985).

De plus, l'étude de données sur des lactations pendant 6 ans, sur 516 élevages (soit 24 000 lactations) situés à proximité d'une ligne de 400 kV dans le Minnesota, n'a montré aucun effet des niveaux d'exposition sur la production laitière, l'intervalle vêlage-vêlage et le taux de réforme (Martin et al. 1986).

Une seule étude en Suède a mis en évidence des problèmes de fertilité sur deux troupeaux exposés à une ligne de 400kV et 50 Hz (Algers et al. 1981) sans pour autant empêcher la gestation (Burchard et al. 1996).

b) En milieux semi-contrôlés

Plusieurs études ont montré que les CEM dont les caractéristiques sont connues n'avaient pas d'effets sur de nombreux paramètres (tableau 8 ci après) tels que la consommation alimentaire (Busby et al. 1974) , la santé, la reproduction, le nombre de veaux sevrés, le taux de vêlage, le développement sexuel des veaux et le poids carcasse (Angell et al. 1990 ; Raleigh 1988), sur le cycle œstral, la concentration plasmatique en progestérone, l'intensité de l'oestrus, le taux de morbidité et de malformations fœtales (Algers et Hultgren 1987).

Tableau 8 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les bovins, en conditions semi-contrôlées.

Caractéristiques des animaux		Traitement			Effets	Références
Catégorie	Effectif	CE (kV/m)	CM (μT)	Durée (j)		
Bovin viande	ND	12	ND	ND	Pas d'effet sur la consommation alimentaire	Busby et al. 1974
Vache allaitante	574	5.6	ND	ND	Pas d'effet sur la consommation alimentaire, la santé, le taux de mortalité, le sevrage, le taux de vêlage, le développement sexuel des veaux et le poids des carcasses	Raleigh 1988 Angell et al. 1990
Génisses	58	4	2	120	Pas d'effet sur le cycle oestrien et sur le taux de progestérone	Algers et Hultgren 1987

ND = non documenté(e)

Source : d'après Anses 2015

c) En milieu contrôlé

Les essais réalisés en milieu contrôlé mettent en évidence différents résultats regroupés dans le tableau 9 ci après. :

Tableau 9 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) chez les ruminants, en conditions contrôlées.

Caractéristiques des animaux		Traitement					Effets	Références
Catégorie	Effectif	Jours de lactation	Jours de gestation	CE (kV/m)	CM (μT)	Durée (j)		
Vache laitière	16	185	102	10	30	28	↗MSI(+5,5%) ↗TB (+9%) ↗PL (+9%)	Burchard et al. 1996
	16	150	Non gestante	10	30	24-27 (cycle oestral)	↗MSI (+5%) ↘TB (-16%)	Burchard et al. 2003

								↘PL (-5%)	
	16	170	91	10	30	28		Pas d'effet sur la PL et la composition du lait sauf ↘TB (0.25 pts)	Rodriguez et al. 2002
								↗MSI (+6%)	
Génisse	16 ovariectomisée	ND	100	10 (60Hz)	non	28 en continu		Pas d'effet sur la MSI	Burchard et al. 2004
	32	ND	210	non	30	28		↗ poids vifs (+1.2%), GMQ (+30%)	Burchard et al. 2007

Source : d'après Anses 2015

On constate ainsi les résultats varient pour les vaches laitières. En effet, Burchard et al. semblent en premier lieu montrer une augmentation de la production laitière de 9% et une augmentation du TB de 9% en 1996 puis constate une diminution de la production laitière de 5% et une diminution du TB de 16% en 2003. (Burchard et al. 1996 ; Burchard, Monardes, Nguyen 2003).

A ces deux dates, les auteurs observent une même valeur d'augmentation de la matière sèche ingérée, à savoir +5%. Rodriguez et al. ont noté également un valeur proche de 6% d'augmentation de la matière sèche ingérée mais une diminution du TB de 0.25 points.

Sur des génisses, Burchard et al. (2004 et 2007) notent une augmentation du poids vif de 1,2% ainsi qu'un GMQ augmenté de 30% ainsi qu'une diminution du taux de prolactine de 15% et du taux d'IGF-1² de 4% sans expression de signes cliniques, ce qui les a conduit à conclure que les changements détectés lors de ces expositions ne constituent pas un danger majeur pour la santé animale.

En addition, les essais de Burchard et al (1996) et Rodriguez et al. (2002) suggèrent que les effets des CEM sur les animaux seraient influencés par le temps d'exposition, traduisant ainsi une acclimatation de ceux-ci.

² IGF-1 = insulin-like growth factor-1

d) Conclusion :

Le groupe de travail de l'ANSES a donc conclu, compte tenu des données disponibles actuellement :

- que les courants parasites n'ont pas d'impacts sur les performances laitières. Toutefois, les conditions expérimentales ne reflètent pas les conditions d'élevage donc il est difficile d'en extrapoler ces résultats
- que, des effets sur les performances laitières sont rapportés pour des essais avec des CEM en milieu contrôlé. Cependant, les essais de terrain à proximité des lignes de transport d'électricité ne montrent pas un effet sur les performances ou la santé, sous réserve de la variabilité des protocoles déjà utilisés et une seule étude sur la fertilité de 2 troupeaux suédois.

Pour conclure, les données sur les animaux de rente et donc les bovins manquent et les protocoles sont très variables ce qui ne permet pas d'étendre les résultats et d'évaluer l'impact réel sur la santé des animaux. Les études sont majoritairement tournées vers les bovins laitiers, délaissant les races allaitantes qui peuvent elles aussi être exposées à ces phénomènes.

D. MECANISMES PHYSIOPATHOLOGIQUES DES CEM

Le document de l'ANSES présente différents impacts que pourraient avoir les CEM en analysant et regroupant de nombreuses études. Dans cette partie, sera résumée l'analyse de l'ANSES afin d'en tirer des résultats intéressants.

I. Effets sur les rythmes biologiques circadiens

L'explication des effets des CEM sur la perturbation des rythmes circadiens est basée sur les deux hypothèses suivantes : l'action sur la sécrétion de mélatonine et l'interaction des CEM dans le métabolisme redox des cryptochromes rétiniens.

1) Hypothèse de la mélatonine

La mélatonine est sécrétée par l'épiphyse lors de phase d'obscurité, essentiellement la nuit, moment de la journée où sa sécrétion atteint un pic et une sécrétion diurne faible. Cette hormone est impliquée entre autres en tant que facteur de synchronisation des rythmes biologiques chez les mammifères. Elle possède également une action inhibitrice de l'axe hypothalamo-gonadique impliquée dans la reproduction, une action stimulatrice du système immunitaire mais également une action anti-oncogène ((Di Bella et al. 2013),(Vollrath 2001)).

Les études menées sur des animaux le sont sur des animaux de laboratoire tels que le rat et montrent une réduction de l'amplitude du rythme de mélatonine avec une diminution du pic nocturne (Jahandideh, Abdolmaleki 2010 ; Touitou et Selmaoui 2012 ; Swerdlow 2006). Mais ces résultats se sont avérés peu répétables.

L'axe corticotrope présente des variations rythmiques au cours d'une journée. Deux études réalisées sur mouton et souris montrent qu'il n'y a pas de modification du rythme (Thompson et al. 1995 ; Hackman, Graves 1981).

Quelques études ont été réalisées sur les vaches laitières et montrent l'absence d'effet de l'exposition de CE et CM sur le taux de mélatonine (tableau 10 ci après).

Tableau 10 : Effets de l'exposition à des champs électrique (CE) et magnétique (CM) sur les rythmes et le taux de mélatonine [d'après (Touitou et Selmaoui 2012)]

Effectif	Vaches laitières		Traitement			Effets mesurés et critiques (par Touitou et Selmaoui 2012)	Références
	Stade	Gestation	CE (kV/m)	CM (μT)	Durée (j)		
16 multi-pares	185 j lactation	102j	10 (60 Hz)	30	28	Pas d'effet sur le taux de mélatonine	Burchard et al. 1998
32	16 en lactation 170j	16 gestantes 91 j	10 vertical	30 horizontal	28 16h/j (J/N 8h/16h)	Pas d'effet nuit Jour : mélatonine basse Globalement pas d'effet	Rodriguez et al. 2004
16	22 mois	100j	10 (60 Hz)	30	20h/j – 28j 12h/12h J/N)	Absence de variation répétable des paramètres physiologiques, incertitudes sur répétabilité des mesures MEL Absence de suivi des variations [MEL] _{sang} jour/nuit	Burchard et al. 2004
32	20 mois	3 mois	(60 Hz)	30	20h/j – 28j 12h/12h J/N)	Pas d'effet sur le taux de mélatonine Aucun signe clinique	Burchard et al. 2007

Source : ANSES 2015

Concernant l'interaction des CM sur la mélatonine, le groupe d'expert a noté une forte variabilité et un manque de répétabilité. Il a ainsi souligné l'importance de reprendre les campagnes de mesures et de la vérification des effets sur les animaux. En effet, la majorité des études est réalisée sur le modèle des rongeurs et semble indiquer un effet inhibiteur partiel des CEM EBF sur la sécrétion de mélatonine (amplitude du pic nocturne diminué...) pouvant se traduire par des changements comportementaux ou des anomalies des cycles de reproduction.

2) Hypothèse des cryptochromes

Les cryptochromes sont des flavoprotéines sensibles à la lumière bleue présents notamment chez les plantes et les animaux où on les retrouve dans les cellules ganglionnaires de la rétine. La réaction à la lumière bleue enclenche une réaction de photoréduction (Biskup et al. 2011 ; Lagroye et al. 2011 ; Wiltshklo et al. 2011) qui entraîne une sensibilité à la magnétoréception. De plus, il est aujourd'hui connu que les cryptochromes sont des éléments constitutifs de l'horloge circadienne.

Il a été constaté que les cryptochromes seraient capables de détecter le CMT mais aussi que les CEM EBF ont un impact sur leur état d'oxydoréduction (Lagroye et al. 2011 ; Maeda et al. 2012 ; Vanderstraeten 2013) chez un certain nombre d'espèces (oiseaux, espèces non mammifères).

3) Conclusion

Le changement des rythmes circadiens a été démontré expérimentalement pour des modèles autres que les animaux de rente tels que les bovins. La communauté scientifique semblait en premier lieu n'indiquer que l'action sur la sécrétion de la mélatonine. Toutefois, il semblerait que le rôle des cryptochromes soit impliqué également, sans pour autant mettre l'un ou l'autre mécanisme comme cause principale de la modification du rythme circadien. Cependant, il reste à montrer ces phénomènes sur des animaux de rente dont les bovins.

II. Effets sur les canaux ioniques cellulaires des cellules excitables

De nombreuses études ont été menées sur l'effet des CEM sur le transport des ions à travers les membranes cellulaires. Les essais menés ont été réalisés in vitro sur des types cellulaires précoces (foetus ou nouveau-nés), dans des conditions expérimentales très variées qui diffèrent des conditions en élevages. A l'heure actuelle, on ne peut pas relier les résultats sur la dynamique des canaux ioniques à des modifications de fonction ou de comportement.

Par exemple, une étude in vitro a montré que suite à une exposition à un CEM permanent à 50Hz, 125 μ T, la dynamique des canaux calciques de neurones de moelle osseuse de rat a été notée ainsi qu'une augmentation de la durée d'ouverture des canaux potassiques.(Li et al. 2011).

Une autre étude menée concernant un champ statique en alternance avec un CEM EBF de 50 Hz n'a révélé aucune modification significative des courants potassiques à travers des canaux potassiques voltage-dépendants issus de lignée cellulaire de neuroblastomes humains (Gavoçi et al. 2013).

Autre exemple, des cellules souches en culture soumise à un CEM de 1mT, 50 Hz ont enclenché la production de la protéine précoce de l'hormone de croissance ERG1 et amorcé leur différenciation en cellules neuronales (Seong, Moon, Kim 2014).

III. Effets des CEM sur l'ADN

Les CEM sont reconnus depuis de nombreuses années comme des agents capables d'augmenter le risque de leucémie chez l'enfant (Juutilainen, Kumlin, Naarala 2006 ; Wertheimer et Leeper 1979).

1) Méta-analyses

Deux méta-analyses (Juutilainen et al. 2006 ; Juutilainen 2008) ont conclu que les CEM EBF pouvaient potentialiser les effets d'agents génotoxiques. En effet, leur conclusion est que les CM de 100 μ T ou plus interagissent avec d'autres agents chimiques et physiques cancérigènes connus.

Une autre méta-analyse (Vijayalaxmi, Prihoda TJ 2009) a mis en évidence que pour des expositions à des CEM de plus de 0.5 mT, des aberrations chromosomiques ont été observées dans 16.7% des études mais le plus souvent pour des niveaux très élevés de CEM (>1mT). Elle montre alors qu'il y a de nombreux biais dans plusieurs études et que dans 22% des études, les CEM EBF présentent un effet génotoxique.

2) Effets sur les cellules en culture

Des résultats ont été démontrés sur des cellules en culture mais ceux-ci présentent un biais car ils sont consécutifs à l'application de champs supérieur à 1mT, or cette valeur n'est que rarement rencontrée en condition réelle.

Par exemple, une étude a montré que l'exposition à un CEM 50Hz, 1mT engendre des effets génotoxiques par création d'anomalies chromosomiques dix fois plus fréquentes chez les cellules testées que sur les cellules témoins (Winker et al. 2005).

Une autre étude montre que les CEM seuls ne sont pas capables d'entraîner des altérations de l'ADN mais qu'ils peuvent dans certains cas amplifier les effets de produits génotoxiques (péroxyde d'hydrogène, rayonnement ionisants à partir d'une forte dose (>1mT) (Lee et al. 2012).

3) Etudes sur des animaux

Une étude entre autres a réalisé une exposition de souris à des CEM d'intensité variable et montré l'apparition de lésion de l'ADN uniquement pour les valeurs élevées de CEM (>1mT) mais que ces lésions ne sont plus identifiables 24h après l'arrêt de l'exposition au champ (Villarini et al. 2013).

Sur le même modèle, une autre étude a montré une tendance (résultat non significatif) à une augmentation du taux de fécondation pour des valeurs très élevées de champs (1.3 mT pendant 5h). (Hafizi et al. 2014).

4) Conclusions

Pour résumer, les méta-analyses réalisées sur les effets des CEM EBF sur l'ADN semblent indiquer que les CEM EBF engendrent un effet génotoxique et d'altération de l'ADN mais également qu'ils seraient capables d'amplifier les effets génotoxiques d'autres composés. Toutefois, aucune étude sur les bovins n'a été relevée et les valeurs de champs appliqués restent supérieures aux valeurs de terrain.

IV. CEM et stress oxydant

Le stress oxydant se traduit par la synthèse de radicaux libres qui agressent la cellule mais que l'organisme est capable d'éliminer. Lorsque les mécanismes d'élimination sont débordés, cela devient pathologique. En effet, le stress oxydant est reconnu comme étant un facteur d'inflammation, de mutagène mais aussi comme cause de cancers et autres maladies.

Il a été suggéré que la capacité de l'organisme à lutter contre le stress oxydant était altérée par les CEM (par exemple, diminution des capacités oxydantes du plasma et du tissu cardiaque suite à une exposition à un champ de 40Hz, 7mT) (Goraca, Ciejka, Piechota 2010). De plus, d'autres études ont montré que l'organisme (in vitro, in vivo) voyait sa tolérance au stress oxydant diminuer après contact avec un CEM. Or, il est reconnu que le stress oxydant conduit à des altérations de l'ADN (Kryston et al. 2011), ce qui pourraient indiquer que les CEM via le stress oxydant qu'ils provoquent entraînent des altérations de l'ADN.

Attention toutefois, les études ont des conditions expérimentales très différentes, rien n'a été prouvé via des études de terrains sur des animaux d'élevage et en condition d'élevage.

V. CEM et impact sur l'immunité

1) Etudes in vitro

Différents auteurs ont constaté une stimulation de la réponse immunitaire sur des modèles non bovins :

- activation phagocytaire et diminution de la croissance bactérienne de *Staphylococcus aureus* (Akan et al. 2010) pour une exposition de 1 mT et 50 Hz pendant 4 à 6h de cultures cellulaires
- augmentation de l'activité phagocytaire après 45 minutes d'exposition à un champ de 1 mT sur des macrophages de souris et une augmentation de la libération d'une cytokine (interleukine IL1- β) après 24h d'exposition au même champ ainsi qu'une absence d'effet génotoxique du CEM sur les macrophages (Frahm et al. 2006)

Ces auteurs montrent que les CEM peuvent ainsi stimuler la réponse phagocytaire et la production d'interleukines suite au stress induit par l'application de CEM.

Pourtant, les expérimentations de Kleijn et al. indiquent qu'une exposition courte (5 μ T, 30 minutes, 20-5000 Hz) sur des cellules mononuclées de sang humain exposés également à plusieurs microorganismes que les CEM ne modulent pas la réponse immunitaire innée (Kleijn et al. 2011).

2) Etudes in vivo

Les études in vivo ont été principalement réalisées sur des animaux de laboratoires à savoir souris, rat et cobaye.

Plusieurs études ont mis en évidence différentes modifications telles qu'une diminution d'immunoglobulines (Parreno et al. 1984), une diminution du nombre de lymphocytes (Knezević 2005), une diminution des lymphocytes et une augmentation de la concentration en cytokines pro-inflammatoires (Beck et al. 2006 ; Beck et al. 2007).

Cependant une étude n'a pas noté d'effet sur la réponse inflammatoire du rat pour des CEM d'intensité modérée (Salehi, Ghazikhanlou-Sani, Zamani 2012).

Des données existent aussi chez l'Humain notamment via deux études. La première (Bonhomme-Faivre et al. 2003) est réalisée sur échantillon restreint d'hommes (6 traités et 6 témoins) sur une exposition de CEM faible mais sur une longue durée, et indique une diminution de la concentration en lymphocytes CD4 et CD3 mais aussi une augmentation de la concentration en lymphocytes NK. La deuxième étude (Gobba et al. 2009), réalisée sur 121 hommes exposés sur de longue durée à différents CEM (activité professionnelle) a montré une diminution de l'activité des lymphocytes NK.

3) Conclusion sur l'immunité

Pour résumer, ces analyses d'études montrent une diminution du nombre de lymphocytes, une diminution du nombre de lymphocytes NK ou encore un impact sur la production de cytokines. Toutefois, certaines études ne mettent pas en évidence d'impact de l'exposition des CEM.

De plus, le groupe de travail a noté que les protocoles et environnements d'expositions sont très variés donc l'interprétation et l'extrapolation des résultats restent complexes. De même les tailles d'échantillon trop faibles ne permettent pas non plus de conclure. Ainsi on ne peut pas prouver les effets des CEM sur l'immunité.

VI. Stress physiologique

Le groupe de travail de l'ANSES a sélectionné une étude concernant les vaches laitières et réalisée au Canada (Burchard et al. 1996). Des vaches laitières de race Holstein ont été exposées (ou non) pendant 28 jours consécutifs à un CM horizontal de 30 μ T et un CE vertical de 10 kV/m, ce qui correspond à un séjour sous une ligne de 735 kV. A été constaté que la concentration de cortisol plasmatique ne présente pas de variation.

Les autres études réalisées l'ont été sur des rongeurs de laboratoires.

VII. Conclusion sur les mécanismes physiologiques

Les analyses et interprétations des études par le groupe de travail de l'ANSES a donc mis en évidence différents résultats :

- les CEM-EBF semblent être impliqués dans des modifications du rythme circadien via notamment une modification de la sécrétion de mélatonine mais aussi par l'implication de cryptochromes.
- les CEM-EBF paraissent avoir un effet génotoxique mais également avoir un rôle amplificateur de produits génotoxiques notamment chimiques.
- de plus, ils semblent également avoir un effet favorisant le stress oxydant.
- toutefois, il semblerait que les CEM-EBF ne sont pas à rapprocher de dysfonctionnements du système immunitaire et de stress physiologique.

E. CONCLUSION ET DISCUSSION

Le groupe de travail conclut que les résultats obtenus font suite à des expérimentations avec des protocoles, des modèles et des conditions très variés ce qui rend difficile l'établissement de conclusions franches ou des extrapolations aux bovins. Ils déplorent l'absence d'études épidémiologiques à grande échelle sur les CEM mais aussi sur les courants parasites. De plus, les modèles utilisés en expérimentation sont souvent éloignés des bovins (cellules souches humaines, rats, souris, etc...) et très peu d'études ont été réalisées sur les bovins.

Les données relevées ne montrent pas d'effet des CE sur les paramètres de reproduction ni même un réel impact sur le stress physiologique. Quelques essais ont montré en milieu très contrôlés un effet sur la production laitière et l'augmentation de l'ingestion.

Parmi les hypothèses relevées sur les mécanismes d'action des CEM, on peut noter les hypothèses de l'impact sur la sécrétion de la mélatonine et sur les cryptochromes. Ils ont également mis en évidence une stimulation de la réponse immunitaire, l'implication des CEM dans l'effet génotoxique de certains composés et la diminution de la tolérance au stress oxydatif.

Ce qui ressort principalement, est le manque de données, d'où la recommandation de continuer la veille scientifique en examinant attentivement la qualité des protocoles

PARTIE III : COMMENT MESURER LES PHENOMENES ELECTRIQUES PARASITES SUR LE TERRAIN ? COMMENT LES PREVENIR ?

Le document du GPSE 2019 donne de nombreux conseils à mettre en œuvre pour la mesure du courant et des tensions.

Pour suspecter les phénomènes électriques parasites comme causes de troubles sanitaires ou zootechniques, il faut prendre en compte en réalité l'apparition simultanée de problèmes sur les critères comportementaux, physiologiques, zootechniques et sanitaires.

A. MESURES DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Un particulier peut demander une mesure de l'exposition aux ondes électromagnétiques auprès de l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR). Pour cela, il faut remplir un formulaire Cerfa (Cerfa n° 15003*02). Ce service est gratuit.

(pour plus d'informations : <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/mesures-ondes-electromagnetiques>).

B. MESURES DES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES

Pour mesurer un courant, il faut mesurer la tension entre deux structures, et en connaissant la résistance moyenne des animaux, on peut en déduire une approximation de l'intensité du courant qui circulerait.

I. MATERIEL

Un matériel de base est nécessaire tel que des pinces « crocodiles » robustes. Mais il faut aussi se prémunir de matériels spécifiques en fonction de ce que l'on veut mesurer.

Ainsi le GPSE conseille le matériel suivant :

« Pour les prises de tensions alternatives et impulsionnelles au sol, des électrodes en métal (inox, cuivre, aluminium) peuvent être utilisées. Il est nécessaire que le contact au sol soit bien assuré. Pour les prises de tensions continues en milieu ionique (terre, béton, eau), des électrodes spécifiques non polarisables Cu/CuSO₄ sont nécessaires. En revanche, celles-ci ne sont pas adaptées pour le contact direct avec un métal. Pour une mesure de tension de contact continue entre un élément métallique et le sol, il faut utiliser une pointe de touche ou une pince pour le contact avec le métal et une électrode Cu/ CuSO₄ pour le contact avec le sol. Mais dans ce cas, l'emploi d'une seule électrode Cu/CuSO₄ entraîne un écart de mesure par excès de 300 mV environ »

II. APPAREILS DE MESURES

1) Mesures de tension en courant alternatif 50 Hz et en courant continu

Il faut s'équiper d'un millivoltmètre caractérisé par une forte résistance d'entrée et équipés de calibres de mesure distincts pour le courant alternatif 50 Hz et le courant continu.

2) Mesures de courant alternatif 50 Hz

On utilisera un miliampèremètre.

3) Mesures de tensions impulsionnels ou de tensions avec une fréquence supérieure à 50 Hz

Est alors recommandé l'utilisation d'un oscilloscope.

III. METHODES

Afin d'obtenir des données objectives, il est recommandé de mesurer à différents emplacements des bâtiments tels que le cornadis, les tubulures de la salle de traite, les abreuvoirs, les logettes... Ses mesures doivent pouvoir être reproduites facilement, il est donc nécessaire de les repérer.

Ne pas oublier de prendre en compte la résistance moyenne des animaux qui est de 500 ohms, valeur que l'on peut paramétrer au niveau de l'impédance interne de l'appareil de mesure.

1) Mesures en courant

Ces mesures se réalisent entre 2 points de contact comme par exemple le sol et l'abreuvoir, grâce à un ampèremètre et une résistance de 500 ohms (figure 25).

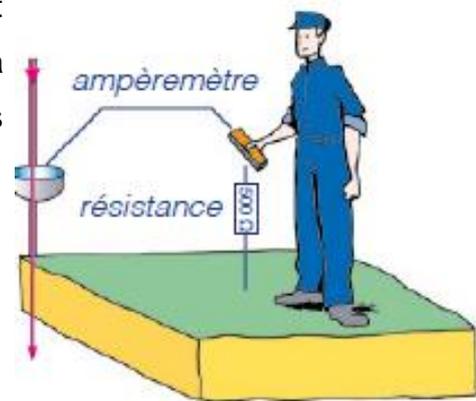


Figure 25 : Mesure en courant

Source image : GPSE 2019

2) Mesures en tension

Accomplies avec un voltmètre, deux méthodes existent :

- mesure de tension de courant effective lorsque l'animal est présent (figure 26)

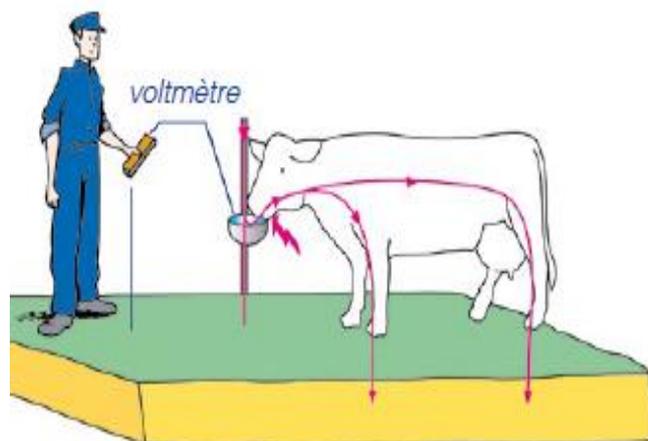


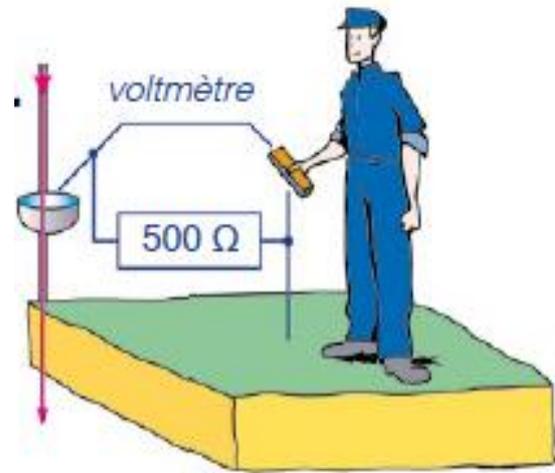
Figure 26 : Mesure de tension entre le sol et l'abreuvoir en présence d'un animal

Source image : GPSE 2019

- avec une résistance équivalente (figure 27)

Figure 27 : Mesure de tension de contact effective avec une résistance équivalente (tension entre le sol et l'abreuvoir, en l'absence d'animal)

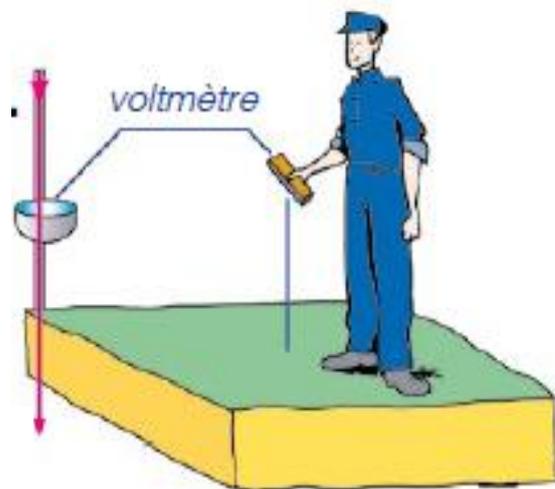
Source image : GPSE 2019



- tension présumée, c'est-à-dire sans animal et sans résistance. C'est cette dernière qui est le plus recommandée car elle est très facile de réalisation et peut s'affranchir d'une résistance accessoire (figure 28).

Figure 28 : Mesure de tension présumée

Source image : GPSE 2019



3) Points de mesures

a) Tension de pas

La mesure est exécutée entre deux électrodes disposées au sol à un espace égal à l'écart entre les pattes antérieures et postérieures des animaux.

b) Tension de contact

La mesure est effectuée, soit entre l'élément conducteur au contact des animaux et une électrode disposée au sol à proximité (environ entre les pattes antérieures et postérieures), soit entre deux éléments conducteurs simultanément accessibles aux animaux.

4) Quels courants parasites rechercher ?

Les principaux courants recherchés sont :

- des tensions alternatives à fréquence industrielle (50Hz), d'origine externe ou interne à l'exploitation
- des tensions alternatives à fréquences supérieures à 50 Hz qui peuvent être liées à des phénomènes de couplage par rayonnement d'ondes électromagnétiques parasites
- des tensions impulsionnelles, liées aux fuites des clôtures électriques
- des tensions continues, générées par un phénomène de couplage électrochimique dans les sols (effet de pile), intrinsèques à l'exploitation.

IV. INTERPRETATION DES MESURES

On peut considérer qu'en dessous de 100 mV, les valeurs de tension mesurée sont négligeables.

1) Courant alternatif de fréquence supérieure ou égale à 50 Hz

La tension comprise entre 100 et 500 mV n'est pas ressentie par les bovins, mais elle est néanmoins significative. On peut ainsi réaliser une mesure supplémentaire en tension ou en courant au travers d'une résistance de 500 ohms. Afin de déterminer son origine interne ou externe à l'exploitation, il faut prendre la mesure avant et après la mise hors tension de l'installation électrique.

2) Tensions impulsionnelles et courants continus

Les données sur ces tensions et cette forme de courant n'existent pas pour le moment.

Des tensions de plusieurs volts semblent toutefois impacter le comportement des animaux (refus d'entrer en salle de traite, agitation). En dessous 1 V, on estime qu'il n'y a pas d'effet notable. Des tensions de cet ordre sont régulièrement mesurées en exploitation et ne semblent pas être corrélés à des perturbations.

C. CORRECTION DES ANOMALIES ELECTRIQUES RENCONTREES

I. PHENOMENES D'ORIGINE EXTERNE A L'EXPLOITATION

Lors d'inductions électrique et magnétique de lignes à haute tension sur les structures du bâtiment, on peut diminuer leur présence en installant des liaisons équipotentielles supplémentaires pour connecter les treillis métalliques des sols en béton par exemple.

On peut également limiter le couplage de lignes à haute tension sur les clôtures métallique en faisant une mise à la terre tous les 50m.

S'il existe un eindection sur des tubulures (cornadis), on peut insérer des éléments isolants, ou encore mettre en équipotentialité le sol et les éléments métalliques.

Au niveau d'un abreuvoir métallique, on peut le relier à la terre afin d'éviter l'apparition de tension parasite.

Lors de couplage de prise de terre, il faut éloigner les prises de terre des deux installations de 10 mètres au moins.

II. PHENOMENES INTERNES A L'EXPLOITATION

1) Décharge électrostatique

Une mise à la terre efficace est indispensable pour se prémunir de ces phénomènes.

2) Courant de fuite

L'entretien de l'installation et des équipements électriques par des professionnels permettent d'éviter ces courants.

De plus, l'utilisation de câbles blindés pour relier les armoires électriques reliées à la terre permet de limiter les perturbations générés par les appareils électriques.

3) Effet pile

Pour l'éviter, il convient de nettoyer le sol au niveau des éléments conducteurs, de relier les éléments métalliques entre eux, de bien les raccorder à la prise de terre

(i.e. liaison équipotentielle supplémentaire), éviter le contact des animaux entre deux matériaux de nature différente.

4) Courants issus des clôtures électriques

De nombreux leviers existent pour éviter ce phénomène tels que de vérifier l'état des isolateurs, éviter le contact avec la végétation, prise de terre éloignée le plus possible des bâtiments (minimum 20 mètres), choisir le bon emplacement (i.e. éviter que le bâtiment se situe entre la prise de terre de l'électrificateur et la clôture, éviter son utilisation à l'intérieur du bâtiment.

CONCLUSION

L'électricité est très présente au sein des exploitations agricoles. En effet, les technologies et outils utilisés au quotidien témoignent de son rôle essentiel. Améliorant les conditions de travail et assistant l'éleveur, l'électricité est un outil indispensable au fonctionnement de la structure d'élevage. Toutefois, cette présence au cœur des bâtiments d'élevage peut parfois engendrer des phénomènes indésirés ayant des répercussions sur les animaux présents à proximité. En effet, deux types de phénomènes issus de l'électricité peuvent être rencontrés, à savoir les champs électromagnétiques et les courants parasites. Ces deux phénomènes différents, qu'ils soient intrinsèques ou extrinsèques à l'exploitation en elle-même, peuvent cependant être perçus ou non par les animaux et notamment par les bovins.

Le document rédigé en 2015 par un groupe de travail de l'ANSES est fondamental dans le traitement et le regroupement des données existantes. En effet, les données ont ainsi pu être comparées et les protocoles critiqués. Le groupe de travail conclut au manque de données sur l'impact zooteknique et sanitaire des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences concernant les animaux de rente. Peu d'expérimentations ont été réalisées sur ces modèles et peu d'études épidémiologiques ont été opérées sur ce thème. Les quelques études réalisées le sont dans des conditions expérimentales très contrôlées et qui diffèrent des conditions d'élevage. Pourtant, les associations et les éleveurs constatent des effets sur le terrain sans pour autant en apporter la preuve scientifique. Ainsi une veille scientifique doit absolument être maintenue et la recherche dans ce thème doit être encouragée. Le regroupement des résultats a montré l'existence de contradictions sur certains résultats.

Concernant les courants électriques, les résultats de différentes études divergent. En effet, pour la production laitière, certains notent une diminution alors que d'autres n'en observent pas, l'augmentation de l'incidence de mammites n'a pas été prouvée expérimentalement, ni même un quelconque effet sur l'immunité. Ainsi, le groupe conclut à un manque de données, le peu étant obtenu sur la base d'expérimentations en milieu très contrôlé et très différentes de l'élevage.

Pour les courants électromagnétiques extrêmement basses fréquences, la synthèse des données montre un impact sur la reproduction seulement sur une étude et une augmentation de consommation de matière sèche et un impact variable sur la

production laitière dans un document également. Leur conclusion tend encore une fois vers un manque de données.

En conclusion, leur synthèse souligne la complexité de conclure par un manque de données et par une difficulté à extrapoler des résultats issus d'expérimentation aux conditions très contrôlées. Ainsi, l'électropathologie est un domaine de la médecine à ne pas négliger car les constats de terrain et ceux des expérimentations diffèrent.

Se prémunir contre ses effets indésirables est essentiel de nos jours, tant les équipements électriques sont présents au cœur même de l'élevage. En effet, les éleveurs possèdent à l'heure actuelle des outils qui peuvent leur permettre lors de conception ou de restauration de bâtiments agricoles, de minimiser ses risques afin de préserver leur troupeau. Des documents tels que ceux du GPSE 2019 ou CNIEL 2019 peuvent ainsi les aider dans leur démarche.

BIBLIOGRAPHIE

Akan Z, Aksu B, Tulunay A, Bilsel S, Inhan-Garip A (2010) Extremely low-frequency electromagnetic fields affect the immune response of monocyte-derived macrophages to pathogens. *Bioelectromagnetics*, 603-612.

Algers B, Ekesbo I, Hennichs K (1981) 'The effects of ultra high voltage transmission lines on the fertility of dairy cows. A preliminary study.' (Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Hygiene with Farrier school, Skara, Suède)

Algers B, Hennichs K (1985) The effect of exposure to 400 kV transmission lines on the fertility of cows. A retrospective cohort study. *Preventive Veterinary Medicine*, 351-361.

Algers B, Hultgren J (1987) Effects of long-term exposure to a 400-kV, 50-Hz transmission line on estrous and fertility in cows. *Preventive Veterinary Medicine*, 21-36.

Aneshansley DJ, Gorewit RC, Price LR (1992) Cow sensitivity to electricity during milking. *Journal of Dairy Science*, 2733-2741

Angell RF, Schott MR, Raleigh RJ, Bracken TD (1990) Effects of a high-voltage direct-current transmission line on beef cattle production. *Bioelectromagnetics*, 273-282

ANSES, 2015. *Conséquences des champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences sur la santé animale et les performances zootechniques*. août 2015.

Beck B, Cholewka A, Królak-Olejnik B, Mertas A, Szliszka E, Drzazga Z, Król W (2006) An effect of extremely low frequency magnetic field on TNF-alpha concentration in serum. *Polish Journal of Environment Studies*, 16-18.

Beck B, Mazur B, Salwiczek A, Królak-Olejnik B, Cholewka A, Drzazga Z, Arendt J, Król W, Ślusarczyk K (2007) Quantitative changes in CD3+ and CD45RA+ lymphocytes in the blood of rats exposed to an extremely low frequency magnetic field. *Medycyna Weterynaryjna*, 946-950.

Biskup T, Hitomi K, Getzoff ED, Krapf S, Koslowski T, Schleicher E, Weber S (2011) Unexpected electron transfer in cryptochrome identified by time-resolved EPR spectroscopy. *Angewandte Chemie - International Edition*, 12647-12651.

Bonhomme-Faivre L, Marion S, Forestier F, Santini R, Auclair H (2003) Effects of electromagnetic fields on the immune systems of occupationally exposed humans and mice. *Archives of Environmental Health*, 712-717.

Burchard JF, Nguyen DH, Block E (1998) Effects of Electric and Magnetic Fields on Nocturnal Melatonin Concentrations in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 722-727.

Burchard JF, Nguyen DH, Monardes HG (2007) Exposure of pregnant dairy heifer to magnetic fields at 60 Hz and 30 μ T. *Bioelectromagnetics*, 471-476.

Burchard JF, Nguyen DH, Monardes HG, Petitclerc D (2004) Lack of Effect of 10 kV/m 60 Hz Electric Field Exposure on Pregnant Dairy Heifer Hormones. *Bioelectromagnetics* **25**(4), 308-312.

Burchard JF, Nguyen DH, Richard L, Block E (1996) Biological Effects of Electric and Magnetic Fields on Productivity of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 1549-1554.

Burda H, Begall S, Červený J, Neef J, Němec P (2009) Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 5708-5713.

Busby IC, Driscoll D, Washbon WE (1974) A field survey of farmer experience with 765 kV transmission lines: November 18-20, 1974. Agricultural Resources Commission, State of New York, Albany, NY.

CNIEL, 2019. *Les courants électriques parasites en élevage laitier* [en ligne]. juin 2019.

Disponible à l'adresse : <https://www.gds31.fr/wp-content/uploads/2019/09/Courants-%C3%A9lectriques-parasites-en-%C3%A9levage-laitier.pdf>

Cuppen JJM, Wiegertjes GF, Lobee HWJ, Savelkoul HFJ, Elmusharaf MA, Beynen AC, Grooten HNA, Smink W (2007) Immune stimulation in fish and chicken through weak low frequency electromagnetic fields. *Environmentalist*, 577-583.

Di Bella G, Mascia F, Gualano L, Di Bella L (2013) Melatonin anticancer effects: Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 2410-2430.

Erdreich LS, Alexander DD, Wagner ME, Reinemann D (2009) Meta analysis of stray voltage on dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 5951-5963.

Frahm J, Lantow M, Lupke M, Weiss DG, Simkó M (2006) Alteration in cellular functions in mouse macrophages after exposure to 50 Hz magnetic fields. *Journal of Cellular Biochemistry*, 168- 177.

Gavoçi E, Zironi I, Remondini D, Virelli A, Castellani G, Del Re B, Giorgi G, Aicardi G, Bersani F (2013) ELF magnetic fields tuned to ion parametric resonance conditions do not affect TEAsensitive voltage-dependent outward K⁺ currents in a human neural cell line. *Bioelectromagnetics*, 579-588.

Gobba F, Bargellini A, Bravo G, Scaringi M, Cauteruccio L, Borella P (2009) Natural killer cell activity decreases in workers occupationally exposed to extremely low frequency magnetic fields exceeding 1 μ T. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 1059-1066

Goraca A, Ciejka E, Piechota A (2010) Effects of extremely low frequency magnetic field on the parameters of oxidative stress in heart. *Journal of Physiology and Pharmacology*, 333-338.

Gorewit RC, Scott NR (1986) Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *Journal of Dairy Science* **69**, 1122-1127.

Gorewit R, Aneshansley D, Ludington D, Pellerin R, Zhao X (1989) AC voltages on water bowls: effects on lactating Holsteins. *Journal of Dairy Science*, 2184-2192.

Gorewit RC, Aneshansley DJ, Price LR (1992a) Effects of voltages on cows over a complete lactation. 1. Milk yield and composition. *Journal of Dairy Science*, 2719-2725.

Gorewit RC, Aneshansley DJ, Price LR (1992b) Effects of voltages on cows over a complete lactation. 2. Health and reproduction. *Journal of Dairy Science*, 2726-2732.

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

Hackman RM, Graves HB (1981) Corticosterone levels in mice exposed to high-intensity electric fields. *Behavioral and Neural Biology*, 201-213

Hafizi L, Sazgarnia A, Mousavifar N, Karimi M, Ghorbani S, Kazemi MR, Meibodi NE, Hosseini G, Toroghi HM (2014) The effect of extremely low frequency pulsed electromagnetic field on in vitro fertilization success late in NMRI mice. *Cell Journal*, 310-315.

HARDY, Sandrine et POYARD, Jean-Louis, 2019. *L'électricité.pdf*. 2019.

Henke Drenkard DV, Gorewit RC, Scott NR, Sagi R (1985) Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *Journal of Dairy Science*, 2694-2702

Jahandideh S, Abdolmaleki P (2010) Prediction of melatonin excretion patterns in the rat exposed to ELF magnetic fields based on support vector machine and linear discriminant analysis. *Micron*, 882-885.

Juutilainen J, Kumlin T, Naarala J (2006) Do extremely low frequency magnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? A meta-analysis of experimental studies. *International Journal of Radiation Biology*, 1-12.

Juutilainen J (2008) Do electromagnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? *Radiation protection dosimetry*, 228-31.

Kirk JH, Reese ND, Bartlett PC (1984) Stray voltage on Michigan dairy farms. *Journal of the American Veterinary Medical Association* , 426-428

de Kleijn S, Bouwens M, Verburg-van Kemenade BM, Cuppen JJ, Ferwerda G, Hermans PW (2011) Extremely low frequency electromagnetic field exposure does

not modulate toll-like receptor signaling in human peripheral blood mononuclear cells. *Cytokine*, 43-50.

Knezević D (2005) Suppression of tumor immunity by electromagnetic fields and glucocorticoids in mice with implanted Ehrlich carcinoma. *Medicinski preglad*, 609-613.

Kryston TB, Georgiev AB, Pissis P, Georgakilas AG (2011) Role of oxidative stress and DNA damage in human carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 193-201.

Lagroye I, Percherancier Y, Juutilainen J, De Gannes FP, Veyret B (2011) ELF magnetic fields: Animal studies, mechanisms of action. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 369- 373.

Lee HJ, Jin YB, Lee JS, Choi JI, Lee JW, Myung SH, Lee YS (2012) Combined effects of 60 Hz electromagnetic field exposure with various stress factors on cellular transformation in NIH3T3 cells. *Bioelectromagnetics*, 207-14.

Lefcourt AM, Akers RM (1982) Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *Journal of Dairy Science*, 2125-2130.

Lefcourt AM, Akers RM, Miller RH, Weinland B (1985) Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *Journal of Dairy Science*, 391-401.

Lefcourt AM, Kahl S, Akers RM (1986) Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *Journal of Dairy Science*, 833-842.

Li G, Li DD, Li YY, Lin L (2011) Effects of 50 Hz magnetic fields with different intensities exposure on transient outward potassium channel of cortical neurons. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 1036-1042.

Liedvogel M, Mouritsen H (2010) Cryptochromes - A potential magnetoreceptor: What do we know and what do we want to know? *Journal of the Royal Society Interface* 7(Suppl. 2), S147-S162.

Maeda K, Robinson AJ, *et al.* (2012) Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 4774-4779

Martin FB, Bender A, Steuernagel G, Robinson RA, Revsbech R, Sorensen DK, Williamson N, Williams A (1986) Epidemiologic study of Holstein dairy cow performance and reproduction near a high-voltage direct-current powerline. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 303- 324.

Norell RJ, Gustafson RJ, Appleman RD Behavioral studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. In 'Winter Meeting of American Society of Agricultural Engineers.', 1982, Chicago, IL, USA

Parreno A, Saraza ML, Mercader J, Delgado JMR (1984) Reduction of plasma gamma-globulin in rats exposed to weak electromagnetic fields. *IRCS Medical Science*, 1092-1092.

Raleigh RJ (1988) 'Joint HVDC Agricultural Study: Final Report.' (Portland, Oregon. US Dep. Energy: Oregon State University, Eastern Oregon Agricultural Research Center, Central Oregon Experiment Station

Raoul D (2010) 'Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension.' (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques: Sénat, France) pp177

Reinemann DJ, Stetson LE, Reilly JP, Laughlin NK (1999) Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 215-222.

Reinemann DJ, Sheffield LG, LeMire SD, Rasmussen MD, Wiltbank MC (1999) Dairy cow response to electrical environment final report part III. Immune function response to low-level electrical current exposure *Minnesota Public Utilities Commission*.

Reinemann DJ, Rasmussen MD, LeMire SD (2002) Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 833-838.

Reinemann DJ, Wiltbank MC, Rasmussen MD, Sheffield LG, LeMire SD (2003) Comparison of behavioral to physiological response of cows exposed to electric shock. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 507-512.

Reinemann DJ, Stetson LE, Laughlin NE, LeMire SD (2005) Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 385-392.

Rigalma K (2009) 'Effets des courants électriques parasites chez les ruminants, en conditions d'élevage.' (Thèse de doctorat. Thèse AgroParisTech, spécialité Sciences Animales. Paris) 198 pp

Rigalma K, Duvaux-Ponter C, Barrier A, Charles C, Ponter AA, Deschamps F, Roussel S (2010) Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology, and milk production and composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 3542-3552.

Rodriguez M, Petitclerc D, Nguyen DH, Block E, Burchard JF (2002) Effect of electric and magnetic fields (60 Hz) on production, and levels of growth hormone and insulin-like growth factor 1, in lactating, pregnant cows subjected to short days. *Journal of Dairy Science*, 2843-2849

Rogers LE, Warren JL, Hins NR, Gano KA, Fitzer RE, Piepel GF (1982) 'Environmental Studies of a 1100 kV prototype transmission line, an annual report for

the 1981 study period.' (Rept. to US Dept. Energy by Battelle Pacific North West Laboratories)

Salehi I, Sani KG, Zamani A (2013) Exposure of rats to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) alters cytokines production. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 1-8.

Seong Y, Moon J, Kim J (2014) Egr1 mediated the neuronal differentiation induced by extremely low-frequency electromagnetic fields. *Life Sciences*, 16-27.

Southwick LH, Wilson DJ, Sears PM (1992) Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one to two volts of alternating current. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 441-444.

Swerdlow AJ (2006) 'Power frequency electromagnetic fields, melatonin and the risk of breast cancer.' (Health Protection Agency, UK) pp180

Thompson JM, Stormshak F, Lee Jr JM, Hess DL, Painter L (1995) Cortisol secretion and growth in ewe lambs chronically exposed to electric and magnetic fields of a 60-Hertz 500-kilovolt AC transmission line. *Journal of animal science*, 3274-3280.

Touitou Y, Selmaoui B (2012) The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 381-399.

Vanderstraeten J (2013) 'Analyse de l'hypothèse de la perturbation des biorythmes par les champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence. Mécanismes possibles, impact en santé publique. Protocoles de mise à l'épreuve.' (Doctorat en Sciences de la santé publique. Université Libre Bruxelles, Ecole de santé publique.) pp164

Villarini M, Ambrosini MV, Moretti M, Dominici L, Taha E, Piobbico D, Gambelunghe C, Mariucci G (2013) Brain hsp70 expression and DNA damage in mice exposed to extremely low frequency magnetic fields: a dose-response study. *International Journal of Radiation Biology*, 562-570.

Vollrath L (2001) Biology of the Pineal Gland and Melatonin in Humans. In 'The Pineal Gland and Cancer.' pp. 5-49. (Springer Berlin Heidelberg)

Wertheimer N, Leeper E (1979) Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 273-284

Vijayalaxmi, Prihoda TJ (2009) Genetic damage in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electro-magnetic fields: A meta-analysis of data from 87 publications (1990-2007). *International Journal of Radiation Biology* 85(3), 196-213

Wilson DJ, Southwick LH, Kaeser DR (1996) Improvement in milk production and udder health following correction of stray voltage on computer feeders. *Agri-Practice (USA)*, 24-29.

Wiltschko W, Wiltschko R, Ritz T The mechanism of the avian magnetic compass. In '22nd Solvay Conference on Chemistry - Quantum Effects in Chemistry and Biology', 2011, Brussels, pp. 276-284

Winker R, Ivancsits S, Pilger A, Adlkofer F, Rudiger HW (2005) Chromosomal damage in human diploid fibroblasts by intermittent exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 43-49

ANNEXE 1 :

I. DIFFERENTS TYPES DE GENERATEURS :

Le générateur permet de maintenir le flux des électrons entre ses deux bornes. Il faut donc qu'il attire les électrons vers sa borne positive (+) mais aussi qu'il les réintroduise par sa borne négative (-) afin de permettre une circulation continue. Il va pouvoir redonner aux électrons leur énergie perdue par le passage dans des récepteurs se situant entre les deux bornes du générateur. Cela peut être fait par réaction chimique ou par action mécanique.

1) Générateurs électrochimiques :

Les générateurs électrochimiques sont aussi appelés **générateurs de courant continu**.

Le courant continu est indépendant du temps et ne se déplace que de la borne positive vers la borne négative du générateur.

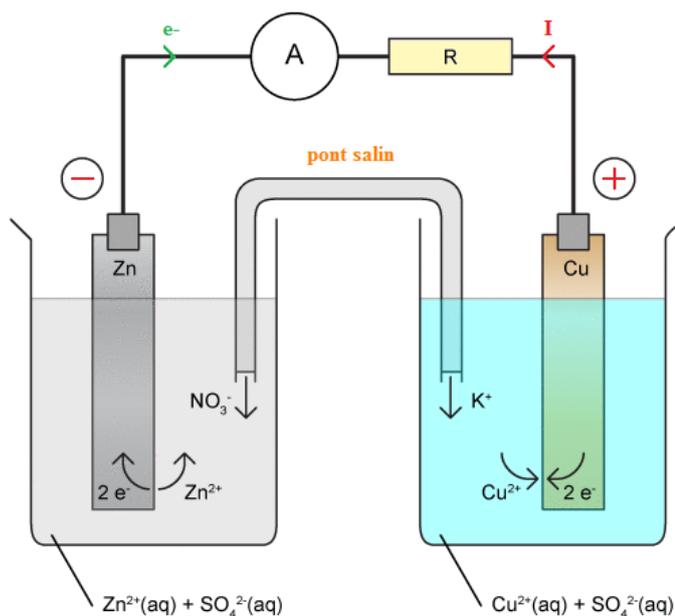


Caractérisation du courant électrique continu.

source image : d'après image issue de GPSE 2019

a) Pile électrique :

Elle est constituée de 2 matériaux conducteurs (zinc et cuivre) plongés dans une solution électrolytique. Cette dernière permet des réactions qui créent des charges positives sur le cuivre et négatives sur le zinc. Le chargement est inutile puisque c'est la dégradation spontanée du zinc dans la solution qui permet la différence de charge.

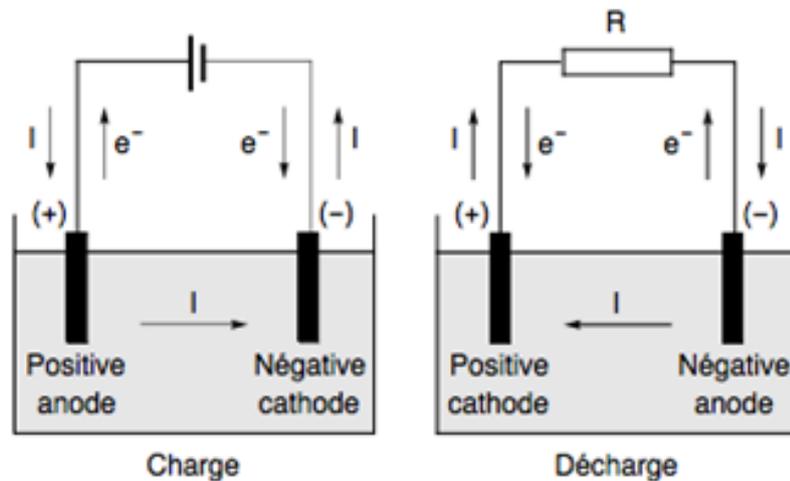


Fonctionnement d'une pile électrique.

Source image : https://www.ilephysique.net/chimie_terminale-piles.php

b) Accumulateur électrique :

Il est constitué de 2 électrodes baignant dans une eau acide. En le connectant à un générateur électrique, la solution de l'accumulateur va créer des charges positives et des charges négatives aux bornes. Il suffit ensuite de le débrancher du générateur puis de le connecter à un circuit et il se comportera alors comme un générateur.



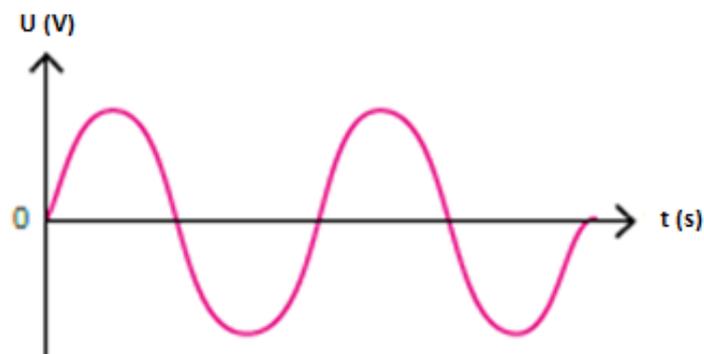
Chargement et déchargement d'un accumulateur au plomb.

Source image : Par Electroche — Travail personnel, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79173950>

2) Générateurs électromagnétiques :

Les générateurs électromagnétiques sont aussi appelés **générateurs tournants**.

Un aimant avec un pôle nord et un pôle sud est mis en rotation sur lui-même contre 2 bobinages qui représentent les bornes. Il y a création de mouvements de charges à l'intérieur du conducteur qui vont rendre ses bornes positives ou négatives à tour de rôle, ce qui permet d'obtenir un courant alternatif. Le nombre de fois où une extrémité sera positive par exemple va définir ce qu'on appelle la fréquence. *Exemple :* pour une fréquence de 20 Hz, chaque borne sera 20 fois positive et 20 fois négatives.



Caractérisation du courant électrique continu.

source image : d'après une image issue de : (GPSE 2019)

Pour ce type de générateur dit monophasé, on définit une tension U qui s'applique entre les deux bornes du générateur et une intensité de courant I qui est susceptible de traverser un récepteur situé entre les deux bornes du générateur dont le sens variera périodiquement selon une fréquence f mesurée en Hertz.

Les générateurs polyphasés eux sont composés de deux ou plus bobinages répartis autour de l'aimant.

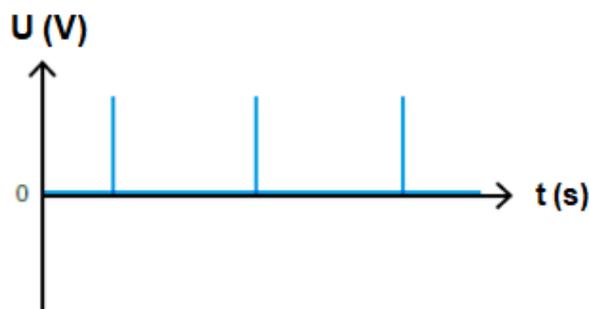
Les générateurs possèdent une résistance électrique intrinsèque qui établie des conditions d'utilisation. (cf partie sur la résistance électrique).

3) Générateurs photovoltaïques :

La lumière du soleil est utilisée comme source afin de produire de l'électricité. Des cellules photovoltaïques produisent un courant électrique continu qui va alors varier en fonction de l'intensité lumineuse, la température et la surface des cellules. Ce courant continue sera ensuite transformé en courant alternatif par un onduleur afin d'être utilisé.

4) Courant impulsionnel

Des pics d'impulsions à intervalles réguliers sont émis, avec une amplitude très courte à savoir maximum 10 millisecondes. C'est ce type de courant que l'on retrouve dans les clôtures électriques.



Caractéristique du courant électrique impulsionnel.

source image : d'après une image issue de : (GPSE 2019)

II. LA PUISSANCE ELECTRIQUE :

Elle correspond à l'énergie électrique E échangée (produite ou consommée) par unité de temps (t). Elle est exprimée en Watt W ce qui équivaut à 1 joule par seconde. Elle est traduite par l'équation suivante :

$$P = \frac{dE}{dt}$$

Dans un circuit électrique, on a le courant électrique qui correspond aux flux de charges par unité de temps et la tension qui permet un transfert d'énergie par unité de charge. L'équation de P peut alors être réduite :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dq} \times \frac{dq}{dt} = \frac{dE}{dq} \times \frac{dq}{dt}$$

On a donc :

$$P = U \times I$$

Cette formule s'applique à un courant électrique continu.

Exemples :

- *Lampe de 15 W sous 230 V, circule un courant de $15/230 = 65 \text{ mA}$*
- *Moteur de courant continue de 5 kW sous 110 V, circule un courant de 45.5 A*

ANNEXE 2 : tableau extrait de ANSES 2015, résumé pour ne contenir que les équipements présents en exploitation de bovins.

Tableau 5 : Champ magnétique émis par différents équipements présents dans les fermes d'élevage. Les champs maximums sont mesurés à une distance de 30 cm. Les incertitudes élargies sont de 18 % pour les CM (Tableau 11, Annexe 4).

Nature de l'équipement	CM (large bande) mesurés (μ T)	Nbre d'appareils mesurés
Armoire de commande	0,05 à 2,63	17
Armoire électrique	0,03 à 24,60	33
Broyeur pour l'alimentation	6,96	1
Chaîne d'alimentation	0,14 à 6,96	6
Centrifugeuse (traitement du lisier)	0,88 à 5,69	2
Chauffe eau	0,05 à 1,05	17
Compresseur	0,44 à 9,70	7
DAC	0,28 à 0,42	3
Groupe électrogène	1,85 à 3,12	2
Hacheur/mélangeur de la fosse à lisier	0,06 à 0,39	2
Lavage du tank à lait	4,09 à 11,02	2
Laveur haute pression	0,12 à 1,03	7
Pompe à lait	1,54 à 9,17	4
Pompe à vide (traite)	0,33 à 2,28	9
Robot de traite	0,25	1
Tank à lait - brasseur	0,05 à 0,97	7
Tank à lait - refroidisseur	0,13 à 2,22	7
Vis d'alimentation (chaîne)	0,04 à 10,91	15

ANNEXE 3 : tableau extrait de GPSE 2019

...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) ^f	Champs magnétiques (en μT) ^f
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 ^c : 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 ^e : 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	<i>Sources : ^a Office fédéral pour la protection contre les rayonnements, Allemagne, 1999, cité par OMS</i>	
Trayeuse ^d : négligeable	Chaîne stéréo ^b : 0,20	<i>^b Belgian BioElectroMagnetics Group, s.d.</i>	
DAL ^d : négligeable	Télévision à écran plat ^{b/e} : négligeable	<i>^c Anses, 2015 (p. 37-38)</i>	
		<i>^d Ministère de l'Agriculture et al, 2003</i>	
		<i>^e Anses 2017, p. 9</i>	
		<i>^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.</i>	

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

Marie ALBESPY

TITRE

**IMPACTS ZOOTECHNIQUES ET SANITAIRES DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES EN
ELEVAGE SUR LES BOVINS : APPROCHE FACTUELLE**

RESUME

Des phénomènes électriques parasites tels que les courants parasites ou encore les courants électromagnétiques peuvent être rencontrés en élevage bovin entre autres. Extrinsèques ou intrinsèques à l'exploitation, ils se manifestent sous différentes formes auxquelles les animaux peuvent être exposés voire percevoir. Si certaines études montrent des effets sur les bovins dans des conditions expérimentales particulières notamment au niveau de l'ingestion ou de la production laitière, la plupart des méta-analyses indiquent clairement un manque de données épidémiologiques ainsi que l'impossibilité d'extrapoler les résultats obtenus.

Malgré le manque de preuves scientifiques des effets sur les bovins, les constatations de terrain (sans preuve factuelle) existent. Ainsi, prévenir ces courants parasites est toutefois essentiel et la correction de défauts électriques peut être réalisée relativement aisément.

MOTS CLEFS bovin ; électricité ; courants ; performances

TITLE

**ZOOTECNICAL AND HEALTH IMPACTS OF ELECTRICAL INTERFERENCES IN CATTLE
BREEDING : FACTUAL APPROACH**

ABSTRACT

Parasitic electrical phenomena such as parasitic currents or electromagnetic currents can be encountered in cattle breeding among others. Extrinsic or intrinsic to the farm, they manifest themselves in different forms to which the animals can be exposed or even perceive. While some studies show effects on cattle under particular experimental conditions, particularly in terms of ingestion or milk production, most meta-analyses clearly indicate a lack of epidemiological data and the impossibility of extrapolating the results obtained.

Despite the lack of scientific evidence of effects on cattle, field findings (without factual evidence) do exist. However, prevention of these parasitic currents is essential and correction of electrical faults can be achieved relatively easily.

KEY WORDS bovine ; electricity ; currents ; performances

JURY

Président : Jean-Marc Soulat
Directeur de thèse : Didier Raboisson
Assesseur : Guillaume Lhermie