

# MEMOIRE

Présenté

A L'ECOLE NATIONALE  
SUPERIEURE D'INGENIEURS DE LIMOGES  
(E.N.S.I.L.)

Pour l'obtention du  
**DIPLOME DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE**

**Discipline** : "Electronique"

**Spécialité** : "Sciences et Techniques pour la Transmission de l'Information"

**Par**

**Sébastien SAHUGUEDE**

*Conception d'une méthodologie de diagnostic électrique en milieu agricole*

soutenu le 3 juillet 2007 devant la commission d'examen composée de :

<b>Dominique Meizel</b>	Président
<b>Jean-Pierre Villotte</b>	Rapporteur
<b>Christian Mouychard</b>	Rapporteur
<b>Bernard Jecko</b>	Directeur des Travaux Universitaires
<b>François Deschamps</b>	Directeur des Travaux Industriels
<b>Philippe Lévêque</b>	Examineur
<b>Bruno Beillard</b>	Examineur
<b>Pierre Laurent</b>	Examineur



# MEMOIRE

Présenté

A L'ECOLE NATIONALE  
SUPERIEURE D'INGENIEURS DE LIMOGES  
(E.N.S.I.L.)

Pour l'obtention du  
**DIPLOME DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE**

**Discipline** : "Electronique"

**Spécialité** : "Sciences et Techniques pour la Transmission de l'Information"

**Par**

**Sébastien SAHUGUEDE**

*Conception d'une méthodologie de diagnostic électrique en milieu agricole*

soutenu le 3 juillet 2007 devant la commission d'examen composée de :

<b>Dominique Meizel</b>	Président
<b>Jean-Pierre Villotte</b>	Rapporteur
<b>Christian Mouychard</b>	Rapporteur
<b>Bernard Jecko</b>	Directeur des Travaux Universitaires
<b>François Deschamps</b>	Directeur des Travaux Industriels
<b>Philippe Lévêque</b>	Examineur
<b>Bruno Beillard</b>	Examineur
<b>Pierre Laurent</b>	Examineur

# Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur François Deschamps, chargé des affaires agricoles à RTE avec qui j'ai pu efficacement collaborer depuis 2005.

Aussi, je remercie Monsieur Christian Mouychard, ingénieur à RTE qui a su m'apporter des connaissances techniques dans le domaine du transport d'électricité.

Je tiens également à remercier l'ensemble des agents de RTE avec qui j'ai pu travailler durant mon DRT.

Je remercie le Professeur Bernard Jecko, directeur scientifique de CISTEME, qui a eu la gentillesse de m'accueillir au sein du centre de recherche, ainsi que l'ensemble du personnel que j'ai pu y rencontrer.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Bruno Beillard, Maître de Conférences à l'IUT du Limousin qui a su m'apporter son soutien technique tout au long de mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Dominique Meizel, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges, de me faire l'honneur de présider le jury de soutenance.

J'associe à ces remerciements Monsieur Jean-Pierre Villotte, Professeur à l'IUT du Limousin, Monsieur Philippe Lévêque, Chargé de Recherche CNRS et Monsieur Pierre Laurent, Ingénieur de la CRAMCO qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury.

Je n'oublie pas de remercier tous les stagiaires que j'ai encadrés au cours de ces 18 mois pour leurs contributions techniques.

Enfin, je remercie Stéphanie pour son aptitude à supporter les odeurs inhérentes à mes déplacements dans les exploitations agricoles ainsi que pour sa relecture de ce manuscrit.

## Table des matières

1	Introduction .....	7
2	Contexte et missions des travaux de recherche.....	9
3	Historique international et national de la problématique "Tension/courant parasite" .....	10
4	Phénomènes et sources des tensions/courants parasites.....	11
4.1	Bases physiques des phénomènes électriques en milieu agricole.....	11
4.1.1	Tension.....	11
4.1.2	Courant.....	12
4.1.3	Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique.....	12
4.1.3.1	Champ électrique.....	12
4.1.3.2	Champ magnétique.....	12
4.1.3.3	Champ électromagnétique.....	13
4.1.3.4	Sources de champs électriques et magnétiques.....	14
4.1.3.5	Intensités de champs électriques et magnétiques.....	14
4.1.3.6	Commentaires.....	16
4.1.3.7	Exposition maximale typique du public aux champs électromagnétiques.....	16
4.1.3.8	Conclusions .....	17
4.1.4	Tension et courant conduit en milieu agricole.....	17
4.1.4.1	Phénomènes accidentels.....	17
4.1.4.2	Phénomènes parasites.....	17
4.2	Conclusion.....	21
5	Mécanismes d'exposition aux courants/tensions parasites.....	22
5.1	L'animal dans un circuit électrique.....	22
5.1.1	Paramètres électriques applicables à l'animal.....	22
5.1.2	Points d'application et trajets de courants.....	22
5.1.3	Tension de contact et tension de pas.....	23
5.1.4	Résistance des trajets de courant.....	23
5.1.5	Facteurs de variations .....	24
6	Effets comportementaux et physiologiques des animaux face aux phénomènes électriques parasites .....	26
6.1	Principales cibles du courant .....	26
6.2	Perception du courant électrique .....	26
6.2.1	Seuil de perception et de nocivité.....	26
6.3	Effets sur le comportement.....	27
6.4	Effets sur les performances et la santé.....	28
6.5	Conclusion.....	29
7	Démarche et moyens de construction de la méthodologie de diagnostic.....	30
7.1	Etat des lieux .....	30
7.1.1	Principe de la démarche GPSE.....	30
7.1.2	Retours d'expérience d'expertises.....	31
7.2	Démarche d'établissement de la méthodologie.....	32
8	La méthodologie de diagnostic.....	33
8.1	Phase 1 : Approche multi-domaines .....	33
8.1.1	Audit de l'exploitant.....	34
8.1.2	Inspection visuelle de l'exploitation agricole.....	34
8.1.3	Analyse de l'approche multi-domaines.....	35
8.2	Phase 2 : Détection.....	36
8.2.1	Détection des non-conformités des installations électriques .....	36
8.2.1.1	Inspection visuelle .....	36
8.2.1.2	Contrôle de la continuité du conducteur de protection.....	37
8.2.1.3	Contrôle de la continuité des liaisons équipotentielles supplémentaires.....	37

8.2.1.4	Mesure de la résistance d'isolement.....	37
8.2.1.5	Mesure de la résistance de la prise de terre.....	38
8.2.1.6	Test des protection différentielle-résiduel.....	38
8.2.2	Détection des indicateurs d'anomalies.....	39
8.2.2.1	Tension de contact en alternatif.....	39
8.2.2.2	Tension de pas en alternatif.....	41
8.2.2.3	Tension de contact en continu.....	41
8.2.2.4	Courants de fuite .....	42
8.3	Phase 3 : Localisation de la source.....	42
8.4	Phase 4 : Identification.....	43
8.4.1	Cas de la source hors de l'exploitation.....	43
8.4.1.1	Réseau de transport d'électricité.....	43
8.4.1.2	Réseau de distribution.....	44
8.4.1.3	Installations électriques au voisinage.....	44
8.4.2	Cas de la source sur l'exploitation.....	44
8.5	Suivi électrique long terme.....	45
9	Moyens de mesures et mode opératoire.....	46
9.1	Moyens de mesures.....	46
9.2	Exemple de mode opératoire.....	47
10	Etudes techniques, support de la méthodologie.....	48
10.1	Amélioration des connaissances.....	48
10.1.1	Etat de l'art des systèmes passifs pour la réduction des courants électriques émis par les machines électriques.....	48
10.1.2	Etude des courants de retour des clôtures électriques .....	50
10.1.3	Développement de solutions d'équipotentialité et définition des règles de construction des bâtiments agricoles exposés à des courants vagabonds dans le sol.....	52
10.1.4	Simulation des phénomènes électriques et définition par la simulation des solutions d'immunisation .....	55
10.1.5	Etude des interactions entre les éléments présents dans les exploitations agricoles et les structures métalliques utilisées pour l'équipotentialité.....	57
10.2	Amélioration des moyens de mesures et de diagnostic.....	59
10.2.1	Pilotage à distance d'un appareil de mesure via le réseau ADSL.....	59
10.2.2	Développement d'un réseau de capteurs sans fil.....	60
10.2.3	Conception d'un système embarqué sur les bovins .....	62
10.2.4	Etat de l'art des méthodes de tomographie électriques et électromagnétiques.....	65
10.2.5	Conception de capteur de champs magnétique en statique et en dynamique.....	68
10.2.1	Premières application de l'expertise environnementale.....	71
11	Conclusions et perspectives.....	74

# 1 Introduction

---

L'électricité, forme d'énergie la plus polyvalente, a envahi tous les secteurs de la vie. Dès sa découverte et surtout dès les premières utilisations qui en ont été faites, son caractère dangereux pour l'homme est apparu comme un facteur limitant son utilisation inconsidérée. Au cours des dernières décennies, nos besoins en énergie électrique d'une part, et les évolutions technologiques d'autre part ont amplifié notre environnement électrique et électromagnétique de manière continue. Il est vrai, de même que l'utilisation du feu exige que l'on fasse attention à éviter les brûlures, celle de l'électricité exige de la prudence.

Il est aujourd'hui légitime que les professionnels du secteur de l'énergie électrique (Électricité de France, Réseau de Transport d'Électricité, les électriciens, ...) cherchent à connaître l'effet que peuvent avoir sur l'environnement et sur la santé tous les phénomènes résultant de l'utilisation de cette énergie.

En dehors des phénomènes de foudroiement et d'électrocution, événements accidentels bien connus, d'autres phénomènes moins perceptibles, et moins bien compris, suscitent effectivement une inquiétude croissante. Pour le public, les notions de phénomènes électriques demeurent floues, voire énigmatiques tant pour ce qui est de leur nature que pour leur effet sur l'être vivant.

Globalement, il s'agit de phénomènes parasites scindés en deux catégories : les champs électromagnétiques et les courants vagabonds.

Les champs électromagnétiques, invisibles sont imperceptibles et correspondent à des ondes électriques et/ou magnétiques se propageant dans l'espace environnant un appareil ou une installation électrique.

Les courants vagabonds circulent dans le sol et les matériaux. Les sources sont diverses. Certains champs électromagnétiques peuvent être à l'origine de ces courants.

Le terme de tension parasite est également employé, et désigne plus précisément l'existence de tensions en des points qui devraient normalement être équipotentiels ou au potentiel de la terre.

Depuis deux ou trois décennies on a vu émerger, à l'étranger puis en France, différents problèmes d'élevage pouvant être attribués aux tensions ou courants dits « parasites » dont la nocivité était longtemps insoupçonnée des vétérinaires, des éleveurs et même des électriciens. Si la nature et les origines de ces phénomènes électriques (champs électromagnétiques et courants vagabonds) sont à l'heure actuelle compréhensibles (processus physique de génération parfaitement connu), les impacts possibles de tels phénomènes, lorsqu'ils entrent en contact avec l'être vivant, demeurent cependant sujets à de grandes incertitudes.

Concernant la santé humaine, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, parmi les études entreprises récemment, aucune ne permet de conclure que l'exposition à des champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles, les lignes électriques ou autres équipements rayonnants aient une incidence néfaste quelconque sur la santé. Toutefois, l'état des connaissances actuelles présente des lacunes qui doivent être comblées pour permettre une meilleure évaluation des risques sanitaires.

Concernant la santé animale et les performances économiques, le discours est comparable. Les études en laboratoire ou épidémiologiques ne permettent pas de conclure sur les effets des champs électromagnétiques en basse fréquence. Les effets des courants vagabonds sont mieux connus et les études montrent que ce phénomène aurait un impact sur la productivité des élevages au delà d'un certain niveau. La problématique posée sur le terrain est alors de détecter l'existence de ces courants, le cas échéant de les localiser, d'identifier les sources et de relier l'existence de ces courants parasites aux problèmes rencontrés dans les exploitations. Bien qu'éleveurs et vétérinaires soient plus sensibilisés aujourd'hui aux phénomènes électriques parasites et à l'impact possible sur les animaux, d'énormes difficultés sont rencontrées dans la manière d'aborder cette nouvelle problématique.

Ainsi, en 1999, un Groupe Permanent sur la Sécurité Électrique (GPSE) dans les élevages agricoles a été créé afin d'établir un état des lieux sur les informations scientifiques relatives aux effets pathologiques de l'électricité chez l'homme et chez les animaux. La deuxième mission du GPSE est de recenser les initiatives mises en place dans certains départements pour éviter les accidents électriques et pour améliorer la sécurité électrique des élevages. Le dernier objectif du GPSE est d'étudier les rares cas litigieux existant entre les

fournisseurs d'électricité (EDF, RTE), fournisseurs d'équipements électriques (fabriquant de machine à traire, ...) et certains agriculteurs, afin d'essayer de comprendre l'origine des conflits et de dégager une méthodologie générale de diagnostic.

La méthodologie proposée par le GPSE consiste à réaliser simultanément : une analyse des troubles électriques supposés (domaine électrique), une analyse de l'état sanitaire du troupeau (domaine vétérinaire) et une expertise des techniques d'élevage utilisées (domaine zootechnique).

C'est dans ce contexte que, en 2004, le directeur de la chambre d'agriculture de Corrèze prit contact avec le chef du département Mesures Physiques de l'IUT du Limousin pour obtenir un avis indépendant sur les problèmes rencontrés par des éleveurs.

Dans la continuité, une collaboration entre la société RTE et l'IUT du Limousin a été créée.

En 2005, deux stages de fin d'études, l'un celui de Julien Ramine (licence professionnelle GPI), l'autre le mien (ingénieur de la filière mécatronique de l'ENSIL) ont été réalisés pour suivre la démarche électrique mise en place par RTE dans l'affaire en Corrèze.

Ces deux stages ont servi de point de départ pour le projet de recherche engagé dans le cadre d'un Diplôme de Recherche Technologique (DRT) dans le centre de transfert technologique associé à XLIM. Ce projet vise d'une part à formaliser une méthodologie de diagnostic électrique dans une expertise GPSE et d'autre part à mener des études afin d'améliorer les moyens de mesure, d'améliorer les connaissances des sources de perturbation et de valider des solutions concrètes aux problèmes électriques en milieu agricole.



## 2 Contexte et missions des travaux de recherche

---

Les travaux de recherche menés durant ce DRT doivent fournir un schéma de conduite du diagnostic électrique ou d'expertise électrique.

Toutes les personnes qui ont un jour été impliquées pour identifier, diagnostiquer et corriger les problèmes de tensions et de courants parasites dans les exploitations agricoles, reconnaissent la complexité des phénomènes. Ces phénomènes, jusqu'à ce jour, apparaissent comme des phénomènes "mystérieux" car intermittents, voire aléatoires.

Au delà des aspects techniques, les aspects humains doivent être intégrés dans la démarche du diagnostic dans le milieu agricole. En effet, ces problèmes causent très souvent des frustrations et colères chez les exploitants du fait de ne pas avoir de connaissances sur les phénomènes électriques régissant les systèmes électriques. De même, peu d'électriciens et d'experts du domaine électrique connaissent la réponse comportementale et physiologique du vivant et dans le cas présent, la réponse des animaux aux courants de très faibles intensités (de quelques centaines de microampères à quelques milliampères). L'autre aspect humain à ne pas négliger dans la mise en oeuvre de la future méthode est l'importance des réactions et des actions des éleveurs face aux problèmes rencontrés.

En conséquence, un des challenges dans la résolution des problèmes de tensions parasites dans les élevages est de persuader l'ensemble des protagonistes que le meilleur moyen d'arriver à la résolution du trouble est de travailler en équipe et que cette résolution doit être basée à partir d'éléments ou faits rationnels. Les solutions ou organisations [NREC] qui ont pu fonctionner, plus ou moins efficacement, en France ou à l'international (Québec, États-Unis) ont généralement impliqué les éleveurs, des électriciens, le fournisseur d'électricité, un représentant d'équipements d'élevage, un vétérinaire, l'agent de la laiterie (dans le cas d'élevage laitier) et un conseil en technique d'élevage. Il est très facile, et en particulier sous la pression des pertes financières de l'exploitation, de transférer la responsabilité du diagnostic et de la solution au problème à une seule personne, entité voire domaine (électrique, vétérinaire, zootechnique). D'où, l'approche globale proposée par le GPSE. Cette approche cherche ainsi à éviter d'incriminer une cause sur des simples impressions en l'absence de toute base scientifique et rationnelle.

L'objectif des travaux de recherche est de proposer un schéma de conduite d'une méthodologie permettant le diagnostic électrique en cas d'anomalie en milieu agricole pouvant être imputée sur une cause électrique. Ce référentiel technique et organisationnel, comprenant un ensemble de protocoles et d'outils de diagnostic scientifique est destiné à l'entité Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité, RTE.

La problématique de détection, d'identification et de correction constitue un domaine complexe où la conséquence et/ou l'effet d'un problème peut être plurifactoriel. Ainsi, en complément des aspects méthodologiques du diagnostic, la création de connaissances a été engagée durant les travaux de recherche. Ces connaissances pourront être utilisées au profit des exploitations d'élevage, pour expliquer l'émergence de phénomènes perturbateurs, pour donner des solutions et pour prévenir de tels problèmes.

L'établissement de la méthodologie de diagnostic électrique et par la suite la conduite du diagnostic pour la résolution de cas réels, doit permettre l'identification des symptômes mais aussi et surtout de la source.

Avant toute chose, il semble être indispensable de définir avec précision les mécanismes d'apparition des symptômes, afin d'évaluer en connaissance de cause sur le terrain les facteurs de risque d'une exposition. De plus, afin d'être en mesure de reconnaître les signes évocateurs (symptômes de comportements ou de troubles) chez les animaux pouvant être dus aux phénomènes de courants parasites, une revue bibliographique est proposée dans le présent document. Ces connaissances de bases sont en effet nécessaires à la bonne compréhension de la méthode d'approche du domaine électrique. Un bref historique international et national de la problématique "Tension/courant parasite" est présenté en amont des considérations bibliographiques.

### 3 Historique international et national de la problématique "Tension/courant parasite"

---

Il est important de noter qu'en matière bibliographique, la plupart des études ont été menées principalement outre atlantique. La problématique "Tension/courant parasite" est, en effet, apparue dans la fin des années 60 aux États-Unis sous le nom anglophone de "Stray Voltage".

L'une des premières études consistant à connaître l'impact de courants dans les animaux d'élevage a été menée en Australie en 1948 [CHURCHWOOD]. Cette étude indiquait que des courants résultants d'équipements électriques dans les salles de traite pouvaient affecter négativement les animaux. De similaires conclusions ont été publiées quelques années plus tard en Nouvelle-Zélande [PHILLIPS]. Le premier cas de tensions parasites aux États-Unis a été rapporté à Washington en 1969 [CRAINE] et au Canada en 1975 [FEISTMAN]. Ces études marginales à l'époque cherchaient principalement à détecter l'existence de ce phénomène électrique.

En 1977, la prise en considération de ce phénomène s'est accentuée. En effet, plusieurs fermes ayant des problèmes de tensions parasites ont été identifiées dans les régions ouest des États-Unis et au Canada [FAIRBANK] [SODERHOLM]. Entre 1978 et 1982, plusieurs documents scientifiques relatant de l'identification et de la résolution des tensions/courants parasites sont publiés [CLOUD].

En 1982, de nombreux articles et notes d'informations vulgarisés sont publiés dans des journaux spécialisés de l'élevage. Cette période marque le début d'une reconnaissance en Amérique du Nord de la problématique Tension/Courant parasite. Ainsi, dans la suite de années 80, les réponses physiologiques et comportementales des animaux aux courants électriques sont caractérisées et des procédures de diagnostic et d'expertise sont développées et mises en oeuvre [NRECA] [NORELL]. Plusieurs groupes de travail, incluant les Universités américaines se sont constitués pour former, sensibiliser les exploitants, les vétérinaires et résoudre les cas déclarés. Aujourd'hui encore, des études afin de quantifier la réponse des animaux d'élevage aux courants parasites sont menées aux États-Unis et au Canada.

Quant aux pays européens, ils se sont peu préoccupés de cette problématique et des effets potentiels des courants parasites sur les animaux jusqu'au début des années 90. Dans les années 1990, à l'initiative de la Confédération Paysanne et selon la volonté du Ministère de l'Agriculture, un rapport a été demandé au Génie Rural des Eaux et des Forêts (GREF) sur les effets des champs électriques et magnétiques sur les animaux d'élevage. Les conclusions de ce rapport mettaient l'accent sur la vétusté de certaines installations électriques, sur la nécessité de sécuriser le réseau de distribution en milieu rural et d'aider les agriculteurs à résoudre un certain nombre de pathologies vétérinaires pouvant être liées aux manifestations électriques.

Le Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique, GPSE a été officiellement constitué en 1999. Un document de vulgarisation sur les dangers de l'électricité et sur les phénomènes électriques en milieu agricole a été diffusé dans le monde agricole à partir de 2000 [GPSE].

La même année, une journée technique organisée à l'Institut Supérieur des Productions Animales et des Industries Agro-alimentaire (ISPAIA) a été organisée sur le thème des problèmes électriques en élevage [BRUGERE]. Sur le terrain les actions françaises s'appuient sur la structure du GPSE depuis sa création, pour intervenir sur les quelques cas à problèmes impliquant le Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE).

En 2003, trois communications dans le Bulletin de la société Vétérinaire Pratique de France ont présenté les phénomènes électriques et les actions nationales et internationales menées à ce sujet.

Depuis 2004, afin de mieux comprendre l'influence de l'électricité sur les animaux d'élevage, RTE a engagé, avec l'appui scientifique de l'Institut National d'Agronomie (INA), un projet de recherche sur le site de la ferme expérimentale de l'INA Paris-Grignon. Ce projet vise notamment à mesurer l'influence des faibles tensions et courants sur les performances des animaux d'élevage.

En plus de la démarche globale GPSE, le manque de connaissances des intervenants électriciens a été mis en lumière de part les difficultés à traiter de manière systématique et rationnelle la problématique électrique sur des cas réels.

Ainsi, en 2005, fut engagé en partenariat avec le centre de transfert technologique CISTEME (Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, en ElectroMagnétisme et Electronique ) le présent projet de recherche, associant le laboratoire de recherche XLIM département OSA, des composantes de l'Université de Limoges (IUT, ENSIL) et l'industriel RTE, Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité.

## 4 Phénomènes et sources des tensions/courants parasites

L'électricité au sens général du terme est un phénomène naturel qui a été l'objet d'observations et d'interrogations dès l'Antiquité. Au VI<sup>ème</sup> siècle avant J.C, Thalès de Milet notait les propriétés d'attraction de l'ambre jaune (en grec *elektron*) et au IV<sup>ème</sup> siècle avant J.C, Démocrite composait un traité sur les propriétés de l'aimant. A partir de III<sup>ème</sup> siècle après J.C, le principe de la boussole était connu en Asie, Mais ce n'est que dans la deuxième moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle que les physiciens commencent à émettre des théories convaincantes sur les lois de l'électricité. On sait à présent que ce sont des forces électriques qui agissent dans les atomes et que la lumière du jour elle-même n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique.

Ainsi, il est nécessaire de définir les phénomènes électriques et de préciser certains termes et grandeurs physiques, afin d'être en mesure de les détecter au sein d'un élevage. Les descriptifs en seront volontairement vulgarisés.

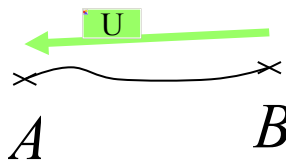
### 4.1 Bases physiques des phénomènes électriques en milieu agricole

Les phénomènes électriques peuvent être scindés en deux grands groupes :

- l'électricité regroupant les notions de tension et courant,
- l'électromagnétisme, regroupant la notion de champ électrique et magnétique.

#### 4.1.1 Tension

La tension  $U$  correspond à une différence de potentiel, exprimée en volt. Le potentiel  $V$  est une tension déterminée par rapport à une référence donnée (la masse, la terre par exemple).



$$U = V(A) - V(B) =$$

**Analogie :** la hauteur correspond à une différence d'altitude. L'altitude est une hauteur déterminée par rapport à une référence donnée (sur terre, le niveau de la mer sert de référence).

$\Rightarrow  \vec{F}  = cte \cdot m_2 = g \cdot m_2$ $W =  \vec{F}  \cdot h = m_2 \cdot g \cdot h$	$\Rightarrow  \vec{F}  = cte \cdot Q_2 = E \cdot Q_2$ $W =  \vec{F}  \cdot d = Q_2 \cdot E \cdot d = Q_2 \cdot U$
	<p><b>U: tension entre <math>Q_2</math> et <math>Q_1</math></b></p>

#### Gravitation

F : Force de gravitation

g : constante de gravitation

m : masse

W : travail ou énergie (mécanique)

h : hauteur

#### Électricité

F : Force électrostatique

E : champ électrique (module)

Q : charge électrique

W : travail ou énergie (électrique)

U : tension

## 4.1.2 Courant

Pour qu'un courant puisse circuler, il faut réaliser un circuit fermé électriquement constitué d'un générateur et d'un conducteur (Illustration 1). Le générateur exerce une force sur les électrons libres de sorte qu'un excès d'électrons apparaît sur une borne, c'est le pôle négatif et un déficit apparaît sur l'autre qui est le pôle positif. L'écoulement dans le conducteur (le courant) dépend alors des dimensions et des caractéristiques électriques du conducteur.

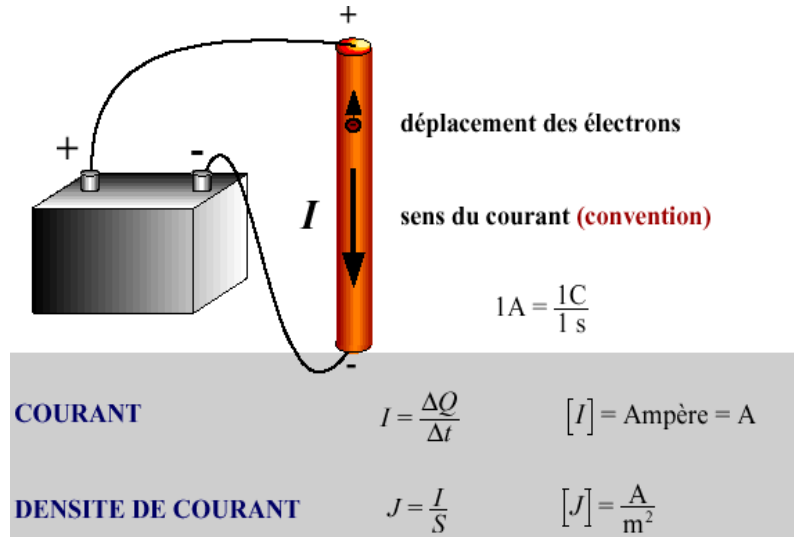


Illustration 1: Courant

## 4.1.3 Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique

Dans notre environnement, ils existent de nombreux phénomènes électriques et magnétiques. Certains sont naturels, tels que les courants électriques telluriques, le champ magnétique terrestre, le champ électrique atmosphérique, les décharges électrostatiques, la lumière du soleil.

D'autres résultent des technologies modernes et de l'utilisation de l'énergie électrique. Dans cette section seront présentées les notions de champ électrique, magnétique et électromagnétique.

### 4.1.3.1 Champ électrique

Une distribution de charges électriques est la source d'un **champ électrique** (noté E). Celui-ci est donc présent dès lors qu'il existe une charge électrique et n'a pas besoin de support matériel.

On appelle champ de forces électriques ou champ électrique les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique.

Le champ électrique peut exister dans le vide. L'intensité de ce champ est mesuré en Volt par mètre (V/m) et décroît avec la distance à la source. Tout appareil électrique, ou conducteur soumis à une tension est source d'un champ électrique proportionnel à la tension de la source à laquelle il est relié. Le champ électrique est stoppé par une obstacle conducteur (effet Faraday). En basse fréquence, cet effet est stoppé avec des matériaux faiblement conducteurs.

### 4.1.3.2 Champ magnétique

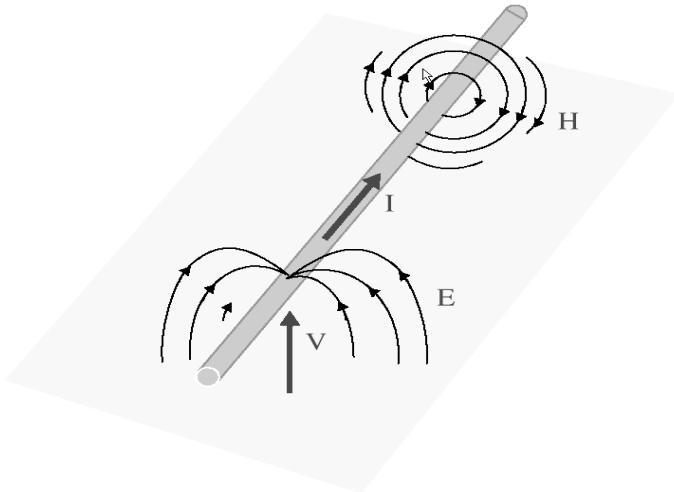
Lorsque des charges électriques sont en mouvement, elles génèrent une nouvelle force : **le champ magnétique** (noté H). Le champs magnétique apparaît lorsqu'il y a déplacement de charges électriques, c'est-à-dire en présence d'un courant électrique.

Un courant I parcourant un conducteur engendre un champ magnétique H exprimé en A/m. Ainsi, lorsqu'un appareil fonctionne, un champ magnétique apparaît.

L'induction magnétique est la grandeur physique qui caractérise l'action exercée par le champ magnétique. L'induction magnétique est notée B. Elle est mesurée en Gauss (G) ou en Tesla (T).

#### 4.1.3.3 Champ électromagnétique

La combinaison des deux champs électriques et magnétiques conduit à parler de **champ électromagnétique**. Ils sont interdépendant et forment le champ électromagnétique (Illustration 2).

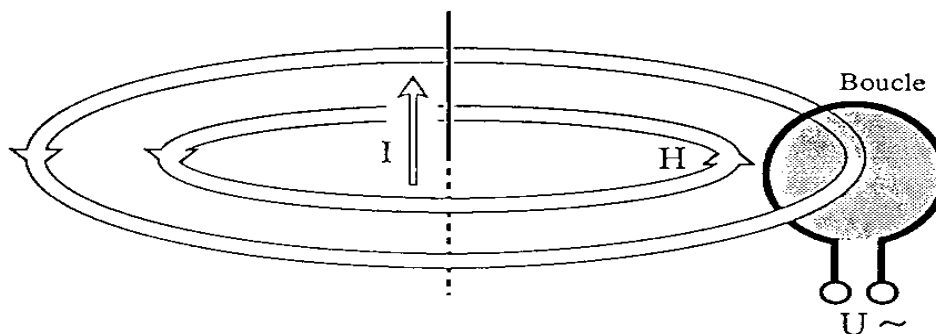


**Illustration 2: Champ électromagnétique**

En première approche, lorsque l'on a un courant électrique, l'intensité du champ magnétique varie selon la consommation d'électricité, alors que celle du champ électrique reste constante puisque la tension ne varie pas.

On parle de champs ELF (Extremely Low Frequency) pour des champs de très basses fréquences, c'est-à-dire d'une fréquence allant jusqu'à 300 Hz. Les champs ELF correspondent aux fréquences employées dans les réseaux de distribution d'électricité, les installations et appareils électriques. Il s'agit de courant à la fréquence 50 Hz en France (60 Hz aux États-Unis). La longueur d'onde de ces champs est de 6000 km. Cette grande longueur d'onde fait qu'on se situe toujours dans la zone dite "de champ proche" et c'est pourquoi, en pratique, les champs magnétiques et électriques se propagent et agissent séparément.

Le champ magnétique induit une tension dans les boucles perpendiculaires aux lignes de champ. La tension induite est proportionnelle à la surface de la boucle (Illustration 3).



**Illustration 3: Tension induite**

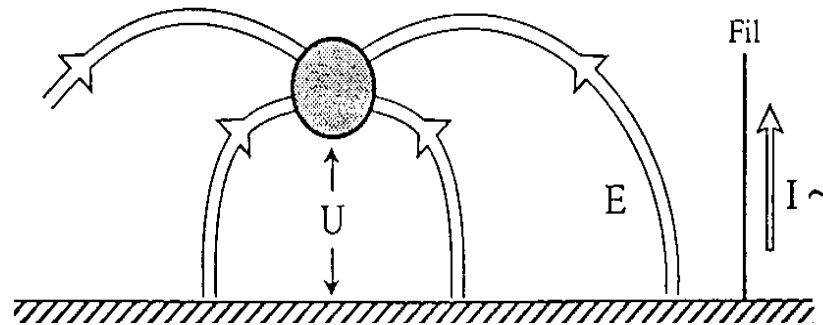
La tension induite peut être déterminée par les relations :

$$U(t) = d \phi(t) / dt = d B \cdot ds / dt$$

où s est la surface de la boucle

$$U = j \omega B \cdot ds = j \omega \mu_0 H \cdot ds$$

Le champ électrique induit un courant sur les fils parallèles aux lignes de champ (Illustration 4).



**Illustration 4: Courant induit**

La valeur du courant  $I$  peut être déterminée par les relations :

$$I(t) = dQ(t) / dt = j \omega Q(t) = j \omega C E \cdot dl$$

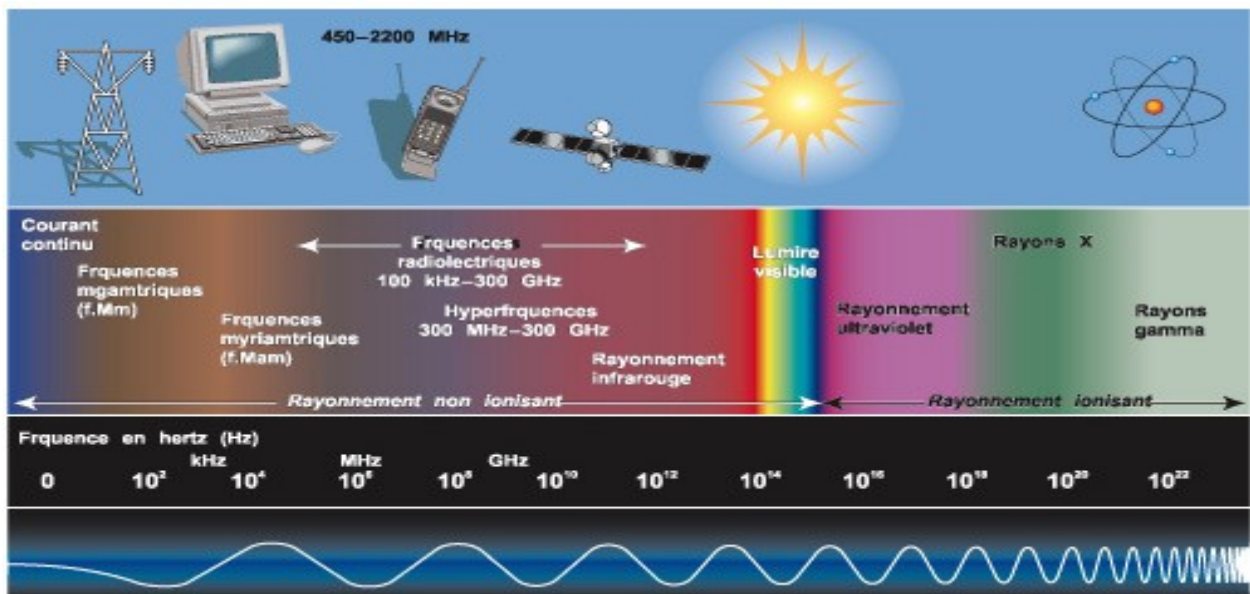
avec  $Q(t) = C \cdot V = C E \cdot dl$  où  $C$  est la capacité linéique du câble.

#### 4.1.3.4 Sources de champs électriques et magnétiques

Les sources principales de champ électromagnétique sont présentes partout dans notre environnement et dans l'environnement des animaux.

Les champs électriques et magnétiques existent à l'état naturel. On peut ainsi parler des champs électriques créés lors des orages, par des phénomènes d'ionisation de l'atmosphère. Le champ magnétique naturel le plus connu est le champ géomagnétique engendré par le noyau ferromagnétique terrestre.

De nombreux champs électromagnétiques résultent de l'activité humaine. Les sources sont d'une part la production, la distribution et l'utilisation de l'électricité (centrale de production, réseau de transport et de distribution, appareils électriques, ...), d'autres part le domaine des télécommunications sans fils (télévision, téléphonie portable, ...). Le spectre électromagnétique est représenté sur l'illustration 5.



**Illustration 5: Spectre électromagnétique**

#### 4.1.3.5 Intensités de champs électriques et magnétiques

Les appareils électriques ménagers ou d'élevage produisent des champs électromagnétiques. Les valeurs présentées dans divers documents techniques peuvent parfois varier de façon importante. En effet, les champs magnétiques générés par de tels appareils varient très rapidement avec la distance et un écart de

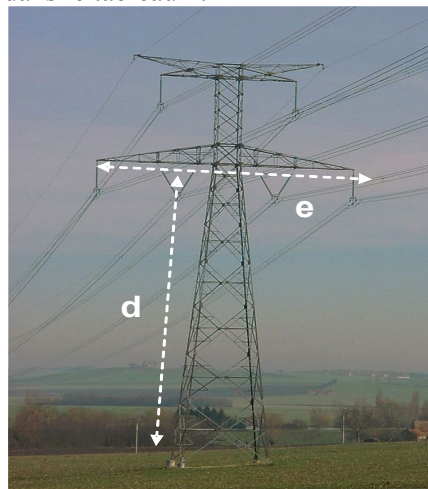
quelques centimètres sur la mesure peut conduire à des écarts importants au niveau de la valeur relevée.

Aussi, un même appellation (exemple : moteur électrique) peut couvrir des technologies différentes avec des écarts importants en terme de champs émis. Le tableau 1 indique les valeurs maximales rencontrées dans différentes sources bibliographiques. Il s'agit de valeurs mesurées à 30 cm de distance de ces appareils sauf quand leur usage se fait à proche distance du corps [RTE-EDF] [OMS].

	<i>Champ électrique E en V/m</i>	<i>Induction magnétique B en <math>\mu T</math></i>
Chaîne audio	180	1
Téléviseur	60	2
Grille-pain	80	0,8
Sèche-cheveux	80	100
Rasoir	Négligeable	500
Ordinateur	Négligeable	1,4
Tank à lait	10	0,25
Trayeuse	Négligeable	Négligeable
Distributeur automatique d'aliment	Négligeable	1,5

**Tableau 1 : Exemples de champs électriques et magnétiques pour des équipements domestiques et d'élevage**

De la même façon, les différentes valeurs de champs mesurées aux alentours des lignes de transport du courant électrique, sont résumées dans le tableau 2.



**Illustration 6: Pylône**

Tension	e (en m)	d (en m)	Champ électrique E (50 Hz) (en V/m)		Champ magnétique H (50 Hz) (en A/m)		Induction magnétique B (50 Hz) (en $\mu T$ )	
			Sous les conducteurs	A 30 m de l'axe	Sous les conducteurs	A 30 m de l'axe	Sous les conducteurs	A 30 m de l'axe
400 kV ( 2kA)	20	9	6 000	2 000	30	12	40	20
225 kV	14	9	4 000	400	20	3	30	4
90 kV (500 A)	8	8	1 000	100	10	1	20	2
20 kV (200 A)	3	6	250	10	6	0,2	10	0,2
220 V (90 A)	1,2	6	10	0,3	1	$\approx 0$	2	$\approx 0$

**Tableau 2 : Exemple de champs électriques et magnétiques 50 Hz des lignes électriques aériennes**

#### 4.1.3.6 Commentaires

Les champs électriques les plus intenses rencontrés dans l'environnement, sont ceux produits sous les lignes à haute tension. Les champs magnétiques les plus intenses se rencontrent normalement à proximité immédiate des certains moteurs ou appareils électriques. Dans tous les cas, les valeurs de champs diminuent rapidement avec la distance. En outre, plusieurs remarques doivent être faites.

Concernant les lignes électriques :

- à distance comprise entre 50 et 100 mètres (valeurs non exposées), les valeurs de champs retombent vite à celles du niveau ambiant, mesurées dans les zones situées loin des lignes électriques,
- d'autre part, les murs des habitations ou des bâtiments d'élevage réduisent l'intensité du champ électrique à une valeur très inférieure à celle qui peut être mesurée à l'extérieur.

Concernant les appareils électriques domestiques et d'élevage, pour un même type d'appareil, les résultats peuvent être très différents suivant la technologie des composants employés. Ainsi, certains sèche-cheveux sont environnés d'un très fort champ magnétique alors qu'avec d'autres celui-ci peut être quasiment inexistant. Il faut donc rester prudent face à des résultats bruts et se garder de toute généralisation intempestive.

Dans le cadre spécifique d'un élevage laitier, il faut signaler que les appareils électriques utilisés présentent des valeurs de champs très faibles voire négligeables.

#### 4.1.3.7 Exposition maximale typique du public aux champs électromagnétiques

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) publie les informations relatives à l'exposition maximale du public aux champs électrique et magnétique, lors d'exposition aux sources les plus courantes. Ces informations figurent dans le tableau 3.

	<i>Exposition maximum typique pour le public</i>	
	<b>Champ électrique E en V/m</b>	<b>Induction magnétique B en <math>\mu</math>T</b>
Champs naturels statiques	200 par beau temps 15000 sous orage	70
Energie électrique Dans les foyers éloignés des lignes à haute tension	100	0,2
Energie électrique Dans les foyers sous des lignes à haute tension	(10000)	20
Trains électriques	300	50
Ecrans de télévision et d'ordinateur au niveau de l'utilisateur	10	0,7

**Tableau 3 : Exemple de l'exposition maximum typique du public à différentes sources de champs électromagnétiques**

En juillet 1999, le conseil des Ministres de la Santé et de l'Union Européenne a adopté une recommandation sur l'exposition du public aux champs électromagnétiques (CEM). Cette recommandation couvre toute la gamme des rayonnements non ionisants, de 0 à 300GHz. Elle se fixe pour objectif d'apporter aux populations "un niveau élevé de protection de la santé contre l'exposition aux CEM". Le tableau 4 précise ces niveaux.

Niveaux de référence pour 50 Hz	Pour le champ électrique	5000V/m
	Pour l'induction magnétique	100 $\mu$ T

**Tableau 4 : Recommandation européenne pour la protection du public**



#### 4.1.3.8 Conclusions

Les niveaux des champs électromagnétiques rencontrés dans les exploitations créés par les réseaux de transport d'électricité et les équipements électriques d'élevage ne peuvent pas en soit constituer une source de perturbation sur le vivant et encore moins une piste d'investigation pour le diagnostic électrique agricole.

Cependant, l'existence d'un champ électromagnétique élevé en un point de l'exploitation peut engendrer par le phénomène d'induction, des courants se propageant ou tensions indésirables dans les bâtiments agricoles souvent constitués de parties métalliques.

#### 4.1.4 Tension et courant conduit en milieu agricole

Cette section traitera du phénomène de tension et courant conduit. Ce phénomène électrique peut être classifié en deux catégories : les phénomènes accidentels et les phénomènes parasites.

<i>Nature</i>	<i>Perturbations conduites</i>	<i>Perturbations rayonnées</i>
<b>Apparition brutale et de forte intensité</b>	Accidentel	Foudroiement
<b>Apparition chronique et de faible intensité</b>	Parasite	Couplage capacitif Couplage inductif

Tableau 5 : Classification des phénomènes électriques

##### 4.1.4.1 Phénomènes accidentels

Trois phénomènes communément connus, électrisation, électrocution et foudroiement sont des phénomènes électriques accidentels. L'électrisation est un phénomène relativement sans gravité, qui correspond au développement de charges électriques dans un corps. On parle d'électrisation lorsque l'individu survit à l'accident électrique. L'électrocution est le passage d'un courant électrique traversant le corps et entraînant la mort. Le foudroiement est le passage d'un courant très élevé (plusieurs centaines d'ampères).

##### 4.1.4.2 Phénomènes parasites

Cinq types de phénomènes perturbateurs peuvent survenir dans les exploitations agricoles que l'on peut scinder en deux catégories selon leur origine : Perturbations issues de la conduction d'un courant (ou perturbations conduites), perturbations issues du rayonnement (ou perturbations rayonnées).

Les perturbations conduites : il s'agit d'un problème électrique "direct", conduit par l'intermédiaire d'un vecteur physique (sol, matériaux, ...). Ces perturbations se nomment : couplage électrochimique, décharge électrostatique et courants vagabonds.

Les perturbations rayonnées : Il s'agit de l'influence d'un champ magnétique ou électrique sur un corps conducteur comme par exemple une structure métallique. Ces perturbations se nomment : induction électromagnétique (ou couplage inductif) et induction électrostatique (ou couplage capacitif).

#### **Perturbations conduites**

La première d'entre eux est le **couplage électrochimique**.

Un métal en contact avec un milieu conducteur, eau ou sol, est le siège de réactions électrochimiques appelées "effet de pile". Ce phénomène entraîne une dissolution du métal de l'anode vers la cathode, c'est-à-dire de la partie métallique vers le milieu ambiant : c'est la corrosion ou oxydation. Cet effet de pile peut faire apparaître une tension continue entre deux structures métalliques ou une structure métallique et le sol.

Ce phénomène est potentialisé en exploitation agricole par l'utilisation de produits tels que les engrais chimiques, la production de lisier et par la présence de structures métalliques.

Les **décharges électrostatiques** constituent une autre perturbation conduite. Il s'agit de l'évacuation instantanée à la terre de charges électriques accumulées sur des matériaux, le plus souvent à la suite de frottements. Lors du contact d'un corps avec une telle accumulation de charges, celle-ci fait office de

conducteur de terre par lequel les charges vont s'écouler.

**Les courants vagabonds** quant à eux sont l'ensemble des courants circulant dans le sol ou dans les structures métalliques. Leur fréquence dépend du phénomène qui leur a donnée naissance : 50/60 Hz quand la source est le réseau électrique ou l'installation électrique. Ces courants peuvent aussi être plus haut en fréquence comme par exemple lorsque la source est les clôtures électriques (~20kHz) ou des systèmes de commandes de moteurs (~100kHz et plus).

Ces courants vagabonds sont susceptibles de créer des tensions parasites entre structures métalliques et entre une structure métallique et le sol, et dans le sol. En effet, le courant électrique retourne vers sa source par le sol. En conséquence, tout courant quittant le conducteur électrique sur lequel il devait être conduit, circulera dans le sol pour rejoindre la source. C'est ainsi que la notion de courant vagabond ou courant de retour est utilisé dans notre problématique. En effet, lors de leur retour à la source, ces courants peuvent créer des tensions de contact ou de pas dans les exploitations agricoles. Par exemple dans le cas d'un défaut électrique dans une installation électrique, tel qu'un court-circuit, les courants de fuite (appellation utilisée pour des courants quittant les installations électriques lors de défaut électrique) rejoignent le transformateur par le sol via le conducteur de terre et la prise de terre de l'installation électrique. La notion de courant de fuite fait l'objet d'une explication plus approfondie dans les paragraphes suivants.

### **Causes et origines des courants vagabonds**

Les sources des courants vagabonds sont multiples :

- les raccordements électriques et appareils défectueux (installation basse tension domestique),
- l'installation d'un système de clôture électrique,
- la proximité du réseau de distribution et de transport d'électricité.

#### **Raccordements électriques et appareils défectueux**

Les raccordements électriques et l'utilisation d'appareils défectueux dans les bâtiments d'élevage est la principale cause des courants vagabonds. Les courants de fuite se réfèrent à des courants électriques, émis par les machines électriques, présentes dans notre cas dans des exploitations agricoles. Ces matériels peuvent être, des systèmes de ventilation et de traitement de l'air, des systèmes de traite automatisés. La liste n'est pas exhaustive mais recense les appareils raccordés au réseau électrique 240V alternatif monophasé ou 380V triphasé suivant leur type d'alimentation.

La définition des courants de fuite d'après la norme électrique française NF C15-100 qui a ses équivalences internationales tels que le CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est la suivante : courant électrique qui, dans des conditions normales de fonctionnement, s'écoule à la terre ou dans des éléments conducteurs.

De part leur définition, les courants de fuite ont pour cause les raccordements électriques ou des appareils défectueux dans l'habitation ou dans les locaux de stabulation. En effet, les installations électriques doivent respecter les normes en vigueur dans le pays d'utilisation des matériels. En France, la norme NF est la NF C15-100. Inévitablement les malfaçons du type, raccordements de câblages (boîtes de dérivations brisées ou non étanches), des défauts d'isolement ou des appareils défectueux (moteurs électriques mal isolés, système d'éclairage à tube fluorescent...) peuvent être la source de courants se propageant par le conducteur de protection, relié aux structures métalliques dans l'exploitation agricole.

**L'installation d'un système de clôture électrique** constitue une des sources de courant dans le sol. La clôture électrique se compose d'un générateur de courants pulsés, d'une clôture et d'une terre de retour. En théorie les courants de clôture n'existent dans le sol que lorsque le circuit est fermé par un animal. Or le phénomène de la capacité parasite entre le sol et le câble métallique de la clôture induit en permanence un courant qui va rejoindre la prise de terre par le sol. Le chemin de retour pris par ce courant n'est pas maîtrisable. Par conséquent, ce courant peut affecter les bâtiments, même éloignés de toute prise de terre d'un électrificateur ou bien éloignés d'une clôture électrique.

Aussi, des fermiers peu informés des problèmes liés à ce type d'installation raccordent le générateur à l'intérieur d'une étable et réalisent la mise à la terre également à l'intérieur de l'exploitation. Parfois la

clôture est destinée à fonctionner dans l'étable même, afin de délimiter les zones de circulation du bétail. Il va de soi que le courant peut circuler sur les structures métalliques, si la clôture est raccordée elle aussi aux barrières en métal. Ceci fait l'objet d'une norme particulière la NF C 15-140.

Les **réseaux de distribution Basse Tension (BT)** constituent l'une des rare sources de courants vagabonds.

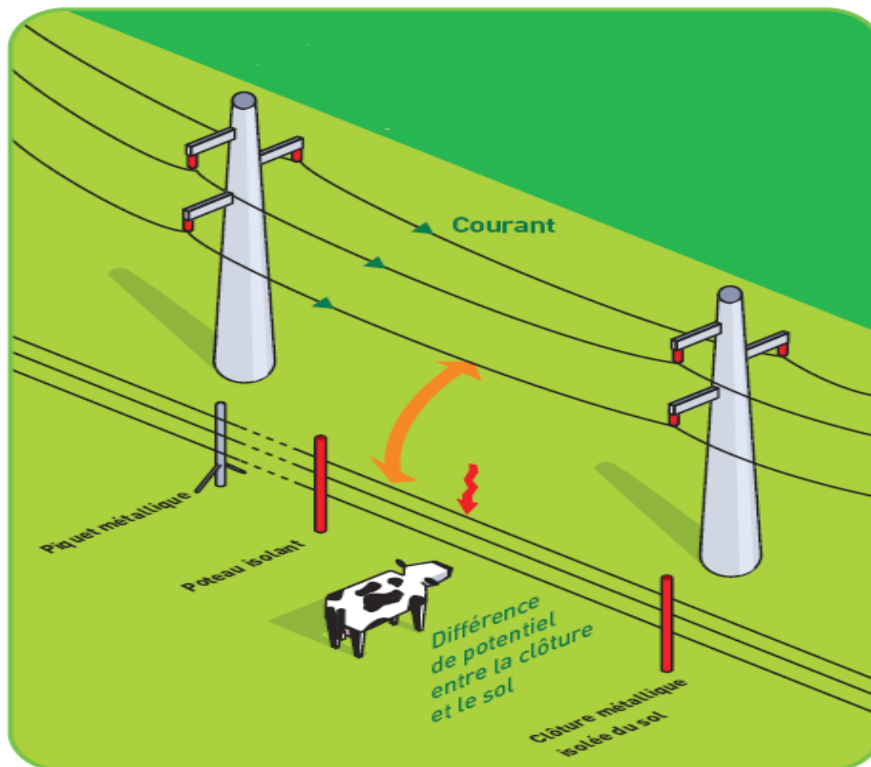
Des faibles courants (quelque dizaine de mA) peuvent quitter le câble de neutre via la mise à la terre du neutre. En effet, le réseau de distribution français possède un câble de neutre permettant le retour des courants depuis les installations domestiques. Afin de fixer son potentiel, le câble de neutre est mis à la terre régulièrement. En fonction de l'impédance des mises à la terre, une petite proportion des courants de retour est dérivée par la mise à la terre dans le sol. Ce courant se propage via la terre pour rejoindre le transformateur.

Le mode de distribution dépend du fournisseur de l'électricité. Globalement on opposera la situation européenne à celle qui existe en Amérique du Nord. Les réseaux Nord-Américains ont comme caractéristique d'avoir une connexion du neutre à la terre à l'intérieur du bâtiment d'élevage ou même parfois aucun câble de neutre n'est utilisé dans les zones retirées. Aussi, ces réseaux possèdent une liaison entre neutre primaire et neutre secondaire dans les transformateurs abaisseurs de tension [PLOK]. Ceci a pour conséquence, que des fluctuations portant sur le neutre en dehors de l'exploitation peuvent être ressenties à l'intérieur de celle-ci et que des modifications d'usage de divers appareillages sont aussi créatrices de perturbations conduites dans les bâtiments. Ceci explique notamment la prise de conscience outre-atlantique de la problématique "Tension/courant parasite".

Le **réseau de transport d'électricité** peut être la source de perturbations rayonnées et conduites. Ces deux types de perturbation sont liés à l'interaction des champs électriques et magnétiques sur les structures métalliques (pylône, câbles) et aussi sur le sol. Le phénomène d'induction de courant et de tensions parasites est également appelé "couplage par rayonnement".

### **Perturbations rayonnées**

L'induction magnétique  $B$  qui traverse une boucle conductrice crée, soit un courant dans la boucle si celle-ci est fermée soit une différence de potentiel si elle est ouverte. Ce phénomène se nomme **l'induction électromagnétique ou couplage inductif**.



**Illustration 7 : Couplage inductif**

Lorsqu'un objet conducteur est placé dans un champ magnétique alternatif, des tensions induites (proportionnelles au flux magnétique capté) se développent à l'intérieur. Si cet objet ferme le circuit, des courants induits, dont l'amplitude dépend de la résistance électrique globale, circulent. L'induction magnétique ne crée des courants induits significatifs que dans les objets conducteurs, comme par exemple les circuits de clôture électrique installés au voisinage des lignes de transport d'électricité. Il peut ainsi naître à partir du phénomène magnétique rayonné, des phénomènes conduits mis en évidence par l'existence d'une tension de pas dans le sol.

Les phénomènes d'induction peuvent générer dans les structures métalliques des courants induits de plusieurs dizaines (voire de centaines) de milliampères. Il s'agit cependant de phénomènes induits dans des boucles métalliques et présentant donc une faible impédance. L'erreur, à ne pas commettre, consiste à mesurer les courants induits au niveaux de ces structures métalliques en s'imaginant que l'animal pourrait en être traversé par le simple fait de les toucher.

## 4.2 Conclusion

En résumé, un animal d'une exploitation agricole est susceptible d'être soumis à des phénomènes électriques dont les sources peuvent être sur l'exploitation (installation électrique basse tension, clôture électrique, effet de pile, ...) ou hors de l'exploitation (réseau de transport/distribution, installation électrique basse tension du voisinage). La présence de lignes électriques au voisinage constitue un facteur de risque à l'émergence de problèmes électriques. Cependant, la cause de la problématique "tensions parasites" peut être interne à l'exploitation.

Aussi, les phénomènes électriques, exposés précédemment, couvrent un large spectre de compétences techniques et scientifiques. Hors, peu de personnes sont disposées à mener de front une expertise électrique, électromagnétique, électrochimique, tout en ayant également une faculté relationnelle avec les exploitants agricoles. C'est pourquoi, un ensemble d'études et de recherches a été mené pour assister la démarche d'établissement de la méthodologie de diagnostic en milieu agricole.

Le point commun des différentes relations physiques mises en jeu par ses phénomènes est la création de tensions parasites à l'origine d'un courant pouvant traverser l'animal. Ces courants alternatifs ou continus qui circulent dans le sol et tout autre élément conducteur, induisent des différences de potentiels entre des structures métalliques non connectées électriquement entre elles et, entre le sol et ces structures métalliques. Il paraît alors essentiel de connaître et de développer les mécanismes d'exposition et la sensibilité de l'animal.

## 5 Mécanismes d'exposition aux courants/tensions parasites

Avant de s'intéresser aux effets susceptibles d'apparaître chez les animaux d'élevage, il est nécessaire d'étudier au préalable les mécanismes supposés d'exposition des animaux aux courants vagabonds.

### 5.1 L'animal dans un circuit électrique

#### 5.1.1 Paramètres électriques applicables à l'animal

La question dans ce paragraphe est de savoir de quelle manière l'animal est susceptible de rentrer en contact avec des courants parasites.

Pour simplifier, l'animal peut être assimilé à n'importe quel autre conducteur électrique. Lorsqu'il s'interpose entre deux points de potentiels différents, il se comporte comme une résistance dans laquelle s'établit un courant. Compte tenu des courants très basses fréquences entrant en jeu, on considérera les impédances purement ohmiques.

Les deux variables principales sont la tension  $U$  et l'intensité  $I$ . Du fait que ces deux grandeurs sont liées par la loi d'Ohm  $U=R.I$ , la tension comme le courant peuvent caractériser le risque pour l'animal. Ceci conduit généralement, à choisir la tension, mais ce n'est pas cette grandeur qui permettra d'établir des relations transposables à tous les animaux d'une même espèce. En effet, on verra par la suite que le véritable stimulus des effets physiologiques et comportementaux est l'intensité du courant qui traverse l'animal.

L'illustration 8 présente le schéma électrique équivalent du bovin [BRUGERE].

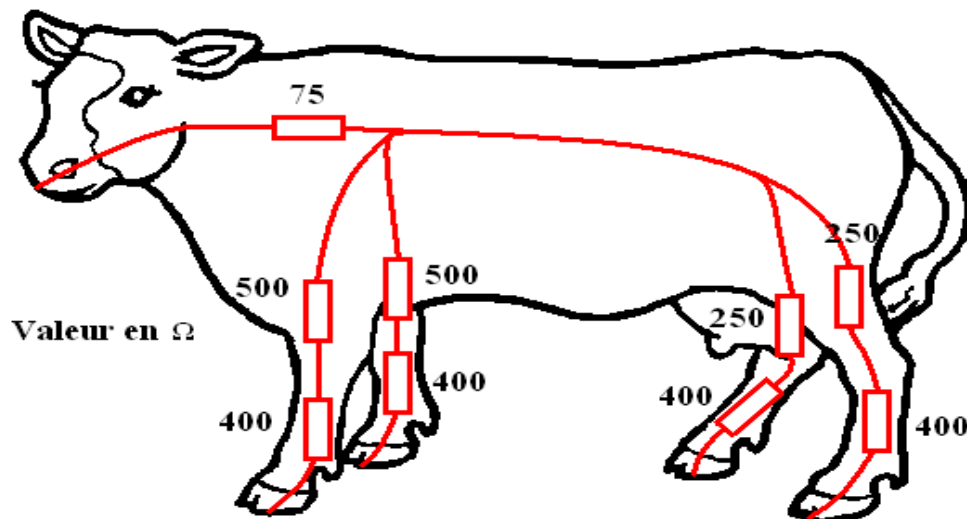


Illustration 8: Exemple de valeurs de résistance des segments corporels de la vache

Trois paramètres sont donc à prendre en compte pour évaluer le stimulus électrique : les points de contact, imposant au courant électrique un certain circuit interne, la résistance corporelle de l'animal, et bien entendu la tension appliquée.

#### 5.1.2 Points d'application et trajets de courants

Dans les conditions habituelles d'élevage, six points du corps de l'animal sont les portes d'entrée et de sortie du courant : la bouche, le mufle, la tête, l'encolure, la mamelle, les sabots, en fonction des contacts aux structures. Les membres (sabots) constituent le point de sortie.

De ces différents points de contact possibles, il en résulte différents trajets de courants pouvant être répartis en deux catégories : ceux issus de tensions de contact et ceux issus de tensions de pas.

### 5.1.3 Tension de contact et tension de pas

Une tension parasite au niveau de deux structures métalliques ou d'une structure métalliques et le sol s'appelle tension de contact.

Dans cette configuration, le courant entre par un point de contact quelconque, traverse le corps de l'animal et revient à la terre en passant par les membres (Illustration 9) ou une autre partie du corps (Illustration 10).

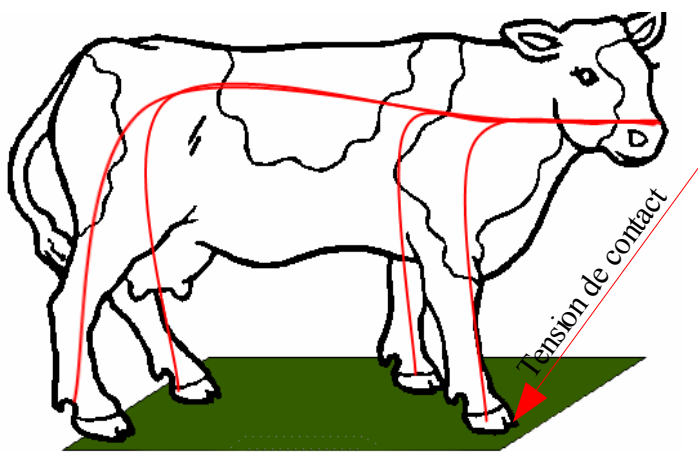


Illustration 9: Tension de contact museau-membres

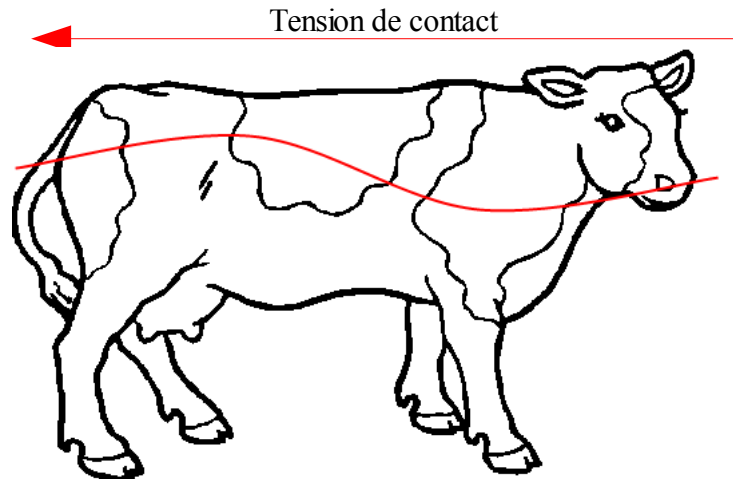


Illustration 10: Tension de contact museau-croupe

Pour la tension de pas, le point d'entrée s'effectue au niveau des membres antérieurs (Illustration 11), le courant traverse le corps de l'animal pour retourner au sol par passage des membres postérieurs. La tension qui existe entre membres antérieurs et postérieurs générant un tel courant est la tension de pas.

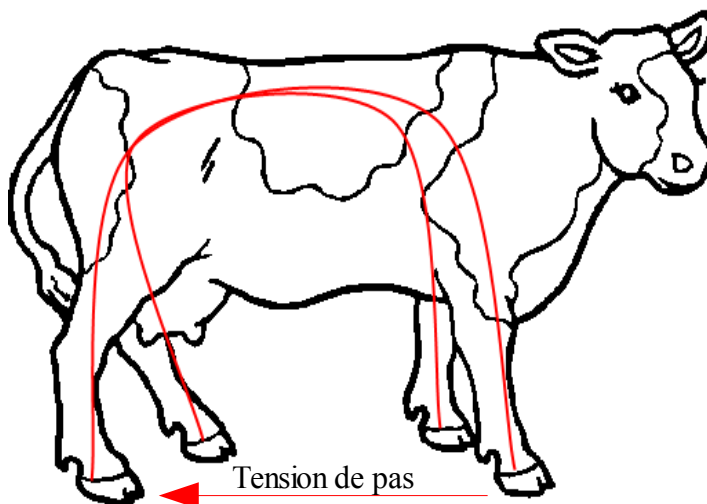


Illustration 11: Tension de pas

### 5.1.4 Résistance des trajets de courant

Connaître la résistance corporelle de l'animal que l'on considère est capital. En effet, il convient de se remémorer la loi d'Ohm, avant de comprendre la sensibilité de tout être vivant aux courants électriques. En effet, pour une certaine tension appliquée entre deux points, le courant susceptible de traverser un corps dépendra de la résistance de celui-ci. Cependant, connaître la tension entre deux points ne suffit pas pour refléter ce que peut subir réellement l'animal. En effet, c'est avant tout au passage de courant que les êtres

vivants sont sensibles, c'est-à-dire à l'intensité. Plus la résistance corporelle est importante, plus l'intensité de courant ressentie sera faible, à tension égale. Etant donné que les trajets de courants, plusieurs scientifiques ont cherché à déterminer la résistance des différents trajets.

Une synthèse des résultats des diverses études réalisées sur le bovin est présentée dans le tableau 6.

<i>Trajet corporel</i>	<i>Moyenne (Ohms)</i>	<i>Ecart (Ohms)</i>	<i>Source</i>
Bouche- tous sabots	350 361	324-393 244-525	Craine (1975) Norell et al (1983)
Bouche – sabots antérieurs	475	345-776	Norell et al (1983)
Bouche – sabots postérieurs	624	420-851	Norell et al (1983)
Membre antérieur - postérieur	300 362	250-405 302-412	Lecourt (1982) Lecourt et al (1982)
Sabots antérieurs -postérieurs	734	496-1152	Norell et al (1983)
Croupe – tous sabots	680	420-1220	Whittlestone et al (1975)
Poitrine – tous sabots	980	700-1230	Whittlestone et al (1975)
Trayon – bouche	433	294-713	Norell et al (1983)
Trayon – tous sabots	594 880	402-953 640-1150	Norell et al (1983) Whittlestone et al (1975)
Trayon – sabots antérieurs	710	503-1203	Norell et al (1983)
Trayon – sabots postérieurs	874	593-1508	Norell et al (1983)
Tous trayons -tous sabots	1320	860-1960	Whittlestone et al (1975)
Mamelle – tous sabots	630	510-980	Drenkard et al (1985)

**Tableau 6 : Mesures de résistance des différents trajets corporels en courant alternatif 50-60Hz**

Pour un même trajet, les auteurs arrivent à des résultats similaires. On peut cependant noter la forte amplitude relevée, et ce que peut sans doute s'expliquer par l'existence d'une forte variation individuelle. Ces résultats ayant permis d'évaluer la sensibilité au courant des différents trajets, permettent de déterminer que le trajet bouche-tous sabots est le plus sensible (plus faible résistance) et le trajet tous trayons – tous sabots, le moins sensible.

La valeur moyenne de résistance retenue chez la vache est de 400-500 ohms.

### 5.1.5 Facteurs de variations

En pratique, la résistance électrique équivalente de l'être vivant est la somme de trois résistances mises en série :

- une première résistance de contact (par exemple au niveau du mufle, point d'entrée du courant)
- la résistance du corps
- une deuxième résistance de contact (typiquement au niveau du contact au sol, point de sortie du courant).

La résistance du corps varie peu d'un animal à l'autre (écart de quelques dizaines d'ohms) car elle est essentiellement liée à celles des tissus musculaires et du sang. Ce sont donc les résistances de contact qui amènent le plus de variabilité à la résistance électrique équivalente de l'être vivant. Ainsi du fait que la résistance équivalente de chaque animal est différente, pour une même tension appliquée, le courant qui traverse chaque animaux est différent et les effets de ces courants sont eux aussi différents en fonction des individus et des conditions de contact.



Ainsi, dans le cadre d'un diagnostic dans des exploitations déclarant des troubles potentiellement liés à l'électricité, il est difficile d'estimer le courant pouvant traverser l'animal par le simple fait de la mesure de la tension en circuit ouvert et de l'utilisation de la résistance moyenne des animaux (500 ohms). Les courants traversant l'animal n'étant ni maîtrisables et ni mesurables, le diagnostic ne pourra pas être viable si les actions sont décidées en fonction de ces supposés courants.

Dans l'état actuel des connaissances, le diagnostic devra être axé sur la détection de tensions/courants parasites et devra décider des actions à engager en fonction de la présence de ces tensions/courants parasites et non pas en fonction d'un niveau de courant hypothétique qui traverse l'animal.

## 6 Effets comportementaux et physiologiques des animaux face aux phénomènes électriques parasites

---

### 6.1 Principales cibles du courant

Le système nerveux et les muscles présentent une activité électrique physiologique. Ils constituent ainsi une cible privilégiée lors du passage de courant dans l'organisme.

Les effets encourus dépendent de deux variables : le temps d'exposition et le trajet pris par le courant. Plus le temps d'exposition est long, plus les dommages au niveau des organes sont importants. En revanche, l'influence du trajet est complexe. En effet, elle dépend de d'autres paramètres essentiels : la traversée ou non d'organes les plus sensibles, l'intensité à laquelle ils sont exposés, et la différence de potentiel captée ou susceptible de perturber [BRUGERE, 2002].

En prenant par exemple le cas de la tension de pas :

- de par l'anatomie des quadrupèdes, le courant passe au niveau du coeur, alors que chez l'homme, il passe par la partie inférieure du tronc,
- de par la distance séparant les points d'entrée et de sortie du courant (1,8m pour un bovin et 0,8m pour un homme), la différence de potentiel ou de tension de pas sera plus grande.
- de par la résistance propre de l'animal (700 ohms pour le trajet sabots antérieurs – postérieurs), l'intensité du courant appliqué sera importante (résistance de l'homme entre des extrémités sèches est évaluée à 1500 ohms)

Cet exemple prouve que la vache est plus sensible que l'homme.

Cependant, les courants parasites pouvant pénétrer dans l'animal sont relativement faibles (de la centaine de microampères à quelques milliampères) et de ce fait, les cibles de courant ne subiront pas les mêmes dommages que ceux engendrés par les phénomènes accidentels tel que l'électrocution.

En conséquence, les effets de courants vagabonds sont principalement conditionnés par des facteurs d'ordre électriques, qui combinés, détermineront l'impact sur l'individu exposé [APPLEMAN]. Ces facteurs se résument en :

- tension aux points de contact,
- résistance aux points de contact et impédance de la source équivalente de la tension parasite,
- nature du sol et des structures conductrices,
- type de trajet corporel,
- facteur influençant la résistance de l'individu exposé.

### 6.2 Perception du courant électrique

La perception du courant peut être considérée comme le premier effet du courant vagabond sur l'animal. Par exemple, au moment où l'animal entre en contact avec des structures présentant une tension, il peut apparaître un phénomène électrique de décharge qui, touchant un organe sensible tel que la langue, peut générer une réaction immédiate et brutale de l'animal.

Cette perception du courant électrique est effectivement modulée par le niveau de sensibilité de l'individu atteint. Cet effet peut induire une situation de stress et conduire à des modifications du comportement.

#### 6.2.1 Seuil de perception et de nocivité

L'animal est sensible au passage d'un courant exprimé en terme d'intensité appliquée. Les niveaux d'exposition auxquels sont sensibles les êtres vivants devraient s'exprimer en Ampères. Cependant, en

retenant la valeur moyenne de résistance corporelle de 500 ohms pour les bovins, on peut appliquer la loi d'ohms pour obtenir une notion de tension en volts.

Bénéficiant d'une certaine résistance corporelle, la tension avec laquelle l'animal rentre en contact doit atteindre une valeur de seuil pour induire une intensité de courant ressentie et susceptible d'avoir des conséquences. La recherche scientifique s'est donc appliquée à déterminer les valeurs, d'une part de la perception de courant et d'autre part, les perturbations induites.

Le seuil de perception se détermine par l'observation d'une réaction la plus minime possible telle qu'un frémissement. Il s'agit de la valeur pour laquelle un animal peut ressentir un courant alternatif. Ce seuil de perception correspond chez les bovins à une intensité de 1 mA soit 0,5 volts (pour R=500 ohms) en globalisant les différentes études [MERK].

Le seuil de nocivité correspond à la valeur pour laquelle un animal peut subir des dommages avec altérations de sa productivité ou de la santé. Ce seuil de nocivité varie entre 2 et 6 mA.

### 6.3 Effets sur le comportement

Afin d'éviter l'inconfort provoqué les courants/tensions parasites, l'animal adopte une stratégie visible par les changements comportementaux qui indiquent un état de stress de l'animal.

Les modifications de comportement observées sont de deux ordres : réactions dues à la perception de courant et troubles de comportement engendrés par le stress de perception chronique.

Les **comportements de "réaction"** : il s'agit des réactions à la perception de courant. Ces réactions sont d'autant plus violentes que l'intensité reçue est forte. Il s'agit de frémissements, de mouvements de retrait de coups de pieds, ...

Les **comportements "d'évitement"** : l'animal a déjà connu la mauvaise expérience du contact avec une tension. Avec la répétition de ces agressions, il peut modifier ses habitudes. Ce fait est d'ailleurs tout simplement utilisé dans le principe de la clôture électrique. L'animal mémorise une mauvaise expérience et évite de s'y exposer à nouveau. Lorsqu'une action est incontournable (par exemple la prise d'eau), l'attitude de l'animal consiste à ruser en modifiant son comportement : il se met à laper l'eau au lieu de boire correctement afin de minimiser son temps de contact avec la tension.

Les **comportements anormaux** : il s'agit de comportement francs et parfois graves (dangers envers l'exploitant). L'animal adopte des attitudes anormales pouvant induire des troubles de performance.

Le tableau 7 illustre les différents types de comportements ou symptômes chez les bovins.

<i>Comportements observés</i>	<i>Bovins</i>
Comportements de réactions	Position anormale de la tête Vocalises Tremblement Réactions violentes (coups de pieds, ....) Poil hérissé ....
Comportements d'évitement	Refus d'entrer en salle de traite Sortie précipitée de la salle de traitement Réduction de la consommation d'eau ou d'aliment Lapement d'eau
Comportements anormaux	Piétinement en salle de traite Mauvais positionnement Vidange du pis incomplète lors de la traite

**Tableau 7 : Modifications comportementales observées chez les bovins**

## 6.4 Effets sur les performances et la santé

Les études ont tout particulièrement été portées sur les vaches laitières, du fait que la majorité des troubles rapportés les concernent en affectant la production de lait. Les principaux résultats sont exposés ici :

- Concernant les problèmes de reproduction : aucune incidence des courants vagabonds n'a pu être mise en évidence [GOREWIT].
- Concernant les autres troubles de la santé : Aucun effet direct des courants vagabonds n'a pu être démontré [KIRK], [HULTGREN], [GOREWIT].
- Concernant les mammites et le taux cellulaires dans le lait : aucune étude n'a démontré un lien direct entre exposition à des tensions et mammites et concentration en cellules somatiques [HULTGREN]. [SOUTHWICK].
- Concernant la composition du lait : aucune modification significative n'a été observée [GOREWIT].
- Concernant la production laitière : Si le courant électrique ne semblent pas modifier de façon directe les performances laitières (reproduction, rendement, composition du lait), le stress induits par l'exposition chronique aux courants vagabonds, pourraient être à l'origine de tels troubles.

On retrouve ainsi fréquemment la valeur de 6 mA à partir de laquelle une perception sévère du courant a pour conséquence une baisse de la productivité laitière. Des études américaines [GRAVE] ont exposé dans un rapport sur le bien-être animal, un diagramme représentant les réactions observées chez la vache en fonction du niveau d'exposition de celle-ci et selon la résistance corporelle de l'animal. (Illustration 12)

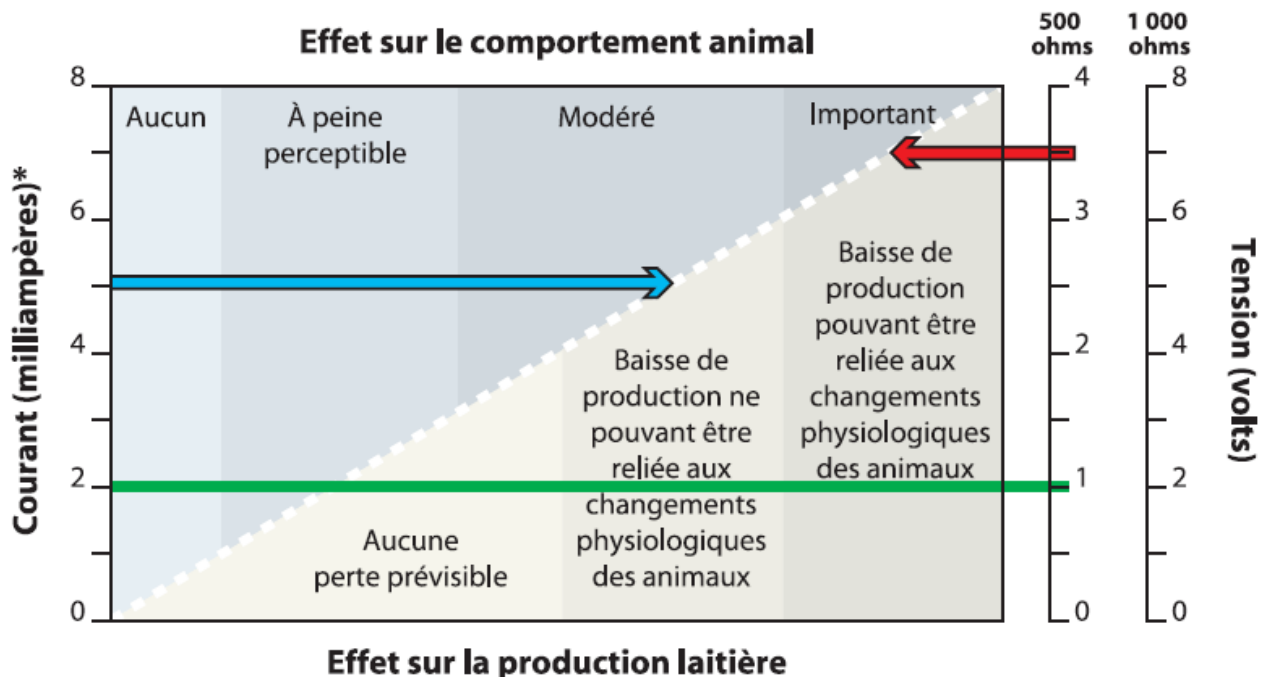


Illustration 12: Effets sur le production et sur le comportement

En condition réelle d'élevage, diverses modifications comportementales et de production ont pu être observées :

- baisse de la quantité de lait produit
- traite inégale et incomplète selon les quartiers mammaires des animaux,
- réduction de la vitesse d'écoulement du lait,
- accroissement du temps de traite, notamment par les difficultés à faire entrer et sortir les vaches dans la salle de traite,
- accroissement des cellules du lait et/ou mammites du fait de la rétention.

## 6.5 Conclusion

Les modifications comportementales semblent être des signes définis de l'exposition aux courants vagabonds. Peu de vaches semblent réagir à des niveaux faibles (tension inférieure à 1 Volt). En effet, la plupart des études montrent des réactions au-delà de 2 Volts. Ces modifications du comportements et parfois de production sont considérées comme un indicateur de trouble dont l'une des causes possibles peut être les courants parasites. Même si les différentes études ne permettent pas de conclure aujourd'hui à un effet direct des courants sur les animaux, les observations de terrain sont multiples et convergent dans la plupart des cas. Ainsi, des études en conditions d'élevage sont menées à Institut National Agronomique de Paris-Grignon afin de combler le manque de connaissances dans ce domaine, ce qui ne fait qu'accroître la confusion qui entoure la question.

## 7 Démarche et moyens de construction de la méthodologie de diagnostic

---

La revue bibliographie précédente a permis d'une part d'exposer le panel de phénomènes électriques parasites potentiellement générateur de trouble en exploitation agricole et d'autre part de connaître les indicateurs de troubles comportementaux et de production pouvant avoir une origine électrique.

Deux principales difficultés sont à retenir :

- la première est qu'un trouble donné ou une conséquence d'un trouble peut généralement avoir plusieurs causes possibles. A un trouble sur la qualité du lait, une mauvaise hygiène peut être également suspecté en plus d'un défaut électrique.
- la deuxième est de donner un diagnostic à partir des mesures électriques en considérant la sensibilité variable des animaux.

Ainsi, le schéma de conduite du diagnostic électrique en milieu agricole, principal objet du projet de recherche RTE/CISTEME se fixe comme objectifs d'amener des éléments de réponses aux questions suivantes :

- Quels sont les troubles déclarés par l'exploitant?
- Existe-t-il dans l'exploitation des anomalies électriques (existence de tensions de pas/contact ou de courant de fuite) ?
- Si oui, où sont les sources et quelles sont elles ?

### 7.1 Etat des lieux

Au démarrage du projet de recherche, il n'existait pas de protocole de conduite du diagnostic électrique dans les exploitations. De plus, aucune instrumentation n'avait été sélectionnée.

Quelques actions de mesures non formalisées, étaient déployées au cas par cas dans des exploitations en fonction de la disponibilité d'experts de RTE. Ces actions de diagnostic rentrent dans le cadre d'une démarche globale inscrite par le GPSE, Groupe permanent sur la Sécurité Électrique

#### 7.1.1 Principe de la démarche GPSE

Suite à un rapport réalisé à l'initiative de la confédération paysanne concernant les effets des champs électromagnétiques sur les animaux d'élevage, il est ressorti la nécessité de sécuriser les réseaux de distribution en milieu rural et d'aider les agriculteurs à résoudre un certain nombre de pathologies pouvant être liées aux manifestations électriques. Un protocole d'accord a ainsi été signé le 19 juillet 1999, afin de mettre en place un Groupe Permanent sur la Sécurité Électrique, GPSE pour une durée de trois ans renouvelables.

Le GPSE est constitué :

- de hauts fonctionnaires du Ministère de l'Agriculture et d'enseignants chercheurs de l'Institut National Agronomique de Paris Grignon et des Ecoles Nationales Vétérinaires,
- de hautes personnalités d'EDF, RTE,
- de syndicalistes du monde agricole,
- de professionnels de la protection contre la foudre,
- de techniciens de la distribution électrique,
- de représentants des compagnies d'assurances.

Les actions du GPSE sont réparties selon trois sous-groupes.

Sous-groupe 1 : faire le point sur les informations scientifiques relatives aux effets

indésirables de l'électricité chez l'homme et les animaux.

Sous-groupe 2 : recenser les initiatives mises en place dans certains départements afin d'éviter les accidents électriques sur l'homme et les animaux, et d'améliorer la sécurité et la fiabilité électrique dans les élevages.

Sous-groupe 3 :

- étudier les cas litigieux existants entre EDF/RTE et certains agriculteurs afin d'essayer de comprendre l'origine de ces conflits,
- dégager une méthodologie pour éviter, à l'avenir, l'apparition de nouveaux cas. Dans ce cas, un protocole GPSE peut être mis en place entre le GPSE et l'exploitant agricole. Dès lors trois domaines interviennent sur le terrain : le domaine vétérinaire, zootechnique, électrique. Chacun des domaines peut intervenir afin de donner ses impressions et un diagnostic sur le problème déclaré par l'exploitant.

La démarche générale du GPSE est donc, le point de départ de l'établissement de la méthodologie de diagnostic électrique. Elle s'intégrera dans un démarche plus générale illustrée par la figure 13.

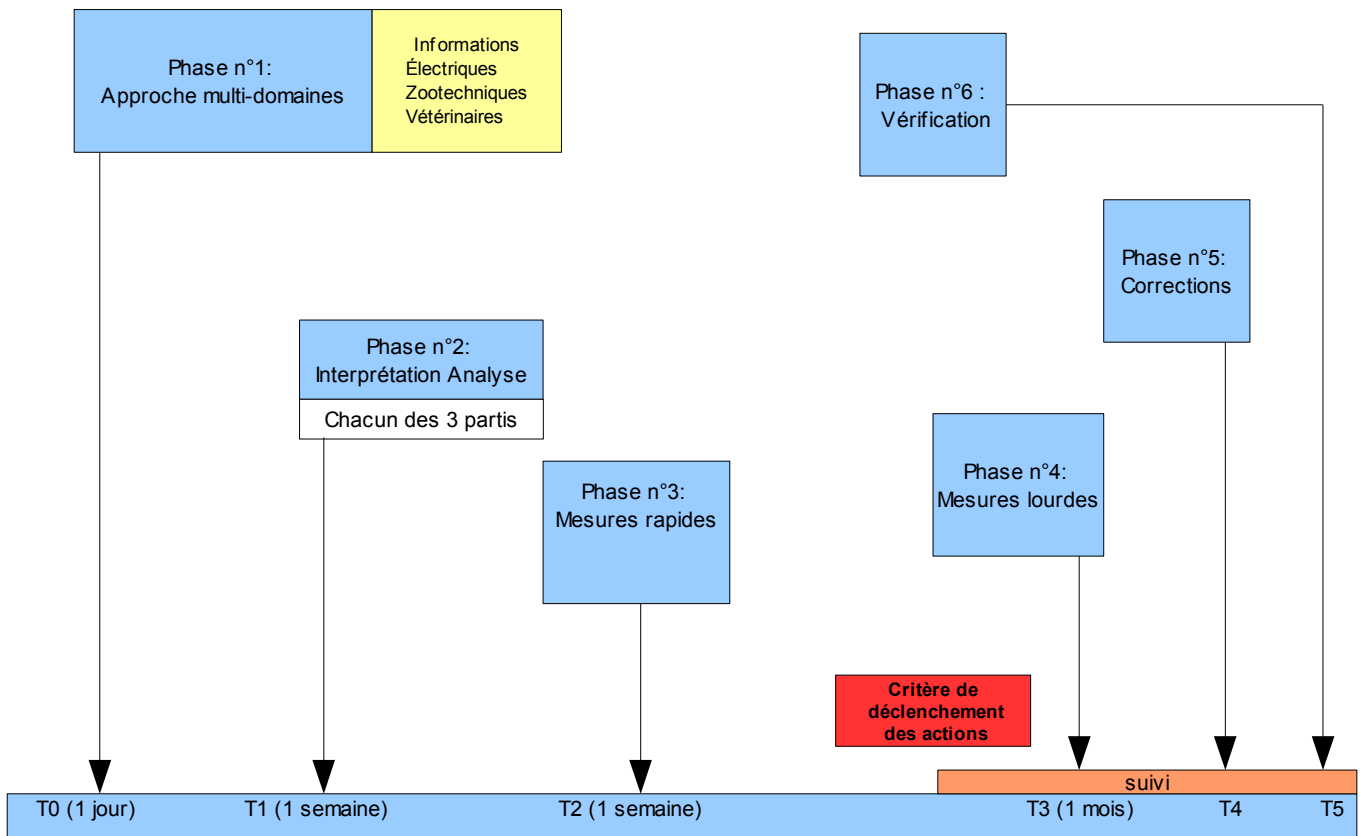


Illustration 13: Démarche multi-domaines du GPSE

### 7.1.2 Retours d'expérience d'expertises

Le deuxième point de départ est constitué des retours d'expériences réalisés lors de plusieurs expertises terrain. En effet, le retour d'expérience établi par le suivi de plusieurs diagnostics d'exploitation a permis de définir un plan d'actions pour l'établissement de la méthodologie de diagnostic et de définir des études nécessaires pour l'établissement de la méthodologie et de son support technique.

Les verrous techniques soulevés du retour d'expérience étaient les suivants :

- le fonctionnement des dispositifs d'équipotentialité (boucle en fond de fouille) et leur impact sur la propagation des courants vagabonds,
- la présence de signal transitoire probablement liée aux équipements électriques présents dans l'exploitation,
- la non maîtrise du phénomène électrochimique "effet de pile",
- la méconnaissance du fonctionnement d'un électrificateur de clôture et des règles d'installation.

Les mesures déployées dans les exploitations étaient basées principalement sur de l'acquisition de signaux électriques de manière à juger de la présence d'une anomalie électrique. Cependant, ces mesures semblaient ne pas être représentatives de la réalité (problème d'induction sur les câbles de mesure, ...). En conséquence, le développement de méthodes et de moyens de mesures doit donc être engagé. Ces moyens intégreront la méthodologie de diagnostic.

Deux lots d'études techniques complètent la réalisation de la méthodologie :

- un premier pour l'amélioration des connaissances des phénomènes électriques et de méthodes de réduction de leur impact sur des pathologies animales,
- un second lot pour l'amélioration des moyens de mesures et des méthodes de diagnostic.

## 7.2 Démarche d'établissement de la méthodologie

Les élevages qui ont servi de support à l'établissement de la méthodologie, n'ont pas été recrutés dans un souci d'étude, mais dans le cadre d'expertises réelles sur des exploitations. En effet, suite à divers problèmes au sein de leurs exploitations, et du fait de la présence d'une ligne THT à proximité de l'élevage, les éleveurs ont suspecté un problème électrique comme cause de leurs difficultés. Dans ce cadre, le GPSE a été conduit à intervenir.

Les phénomènes électriques dans les exploitations d'élevage apparaissent depuis deux ou trois décennies comme un phénomène mystérieux, voire aléatoire et qui plus est, largement en dehors du domaine de compétence habituel des exploitants et des vétérinaires. Les électriciens même, se trouvant souvent dépourvus d'outil technique et de conduite pour un diagnostic électrique en milieu agricole.

Par conséquent, les premières actions engagées parallèlement à l'établissement de la méthodologie ont été définies en plusieurs études :

- l'étude des courants transitoires émis par les machines électriques sur les prises de terre des exploitations et l'état de l'art des systèmes de protection pour la réduction des parasites,
- le développement de solutions d'équipotentialité et de définition des règles de construction des bâtiments agricoles exposés à des courants vagabonds,
- l'étude du fonctionnement et de l'impact d'un électrificateur de clôture,
- l'étude des interactions entre les éléments présents.

Aussi, le projet de recherche comprend d'une part la formalisation d'une méthodologie de diagnostic et d'autre part sont la validation et le développement de moyens ou méthodes de mesure comme par exemple

- le développement d'un réseau de capteur sans fil pour la mesure et l'acquisition de signaux dans un environnement perturbé,
- le développement d'une plate forme d'acquisition adaptée à la méthodologie de diagnostic électrique,
- la conception d'un système autonome embarqué sur les bovins pour la mesure des courants alternatifs pouvant les traverser,
- l'état de l'art des méthodes de tomographie électrique et électromagnétique appliquée au sous-sol.



## 8 La méthodologie de diagnostic

Le déclenchement de la procédure d'étude et de diagnostic d'une exploitation repose sur différents critères autorisant à suspecter l'existence de troubles ayant pour origine un facteur électrique. Par exemple, citons comme critères :

- les troubles présentent un caractère répétitif, quelles que soient les actions appliquées pour les résoudre,
- les troubles varient souvent avec les fluctuations météorologiques (accentuation lors des périodes humides).

Il convient de garder à l'esprit que certaines de ces modifications comportementales ne sont pas spécifiques aux courants vagabonds, les facteurs de stress en élevage pouvant être nombreux.

Le principe général de la méthodologie établie est illustré par le synoptique suivant.

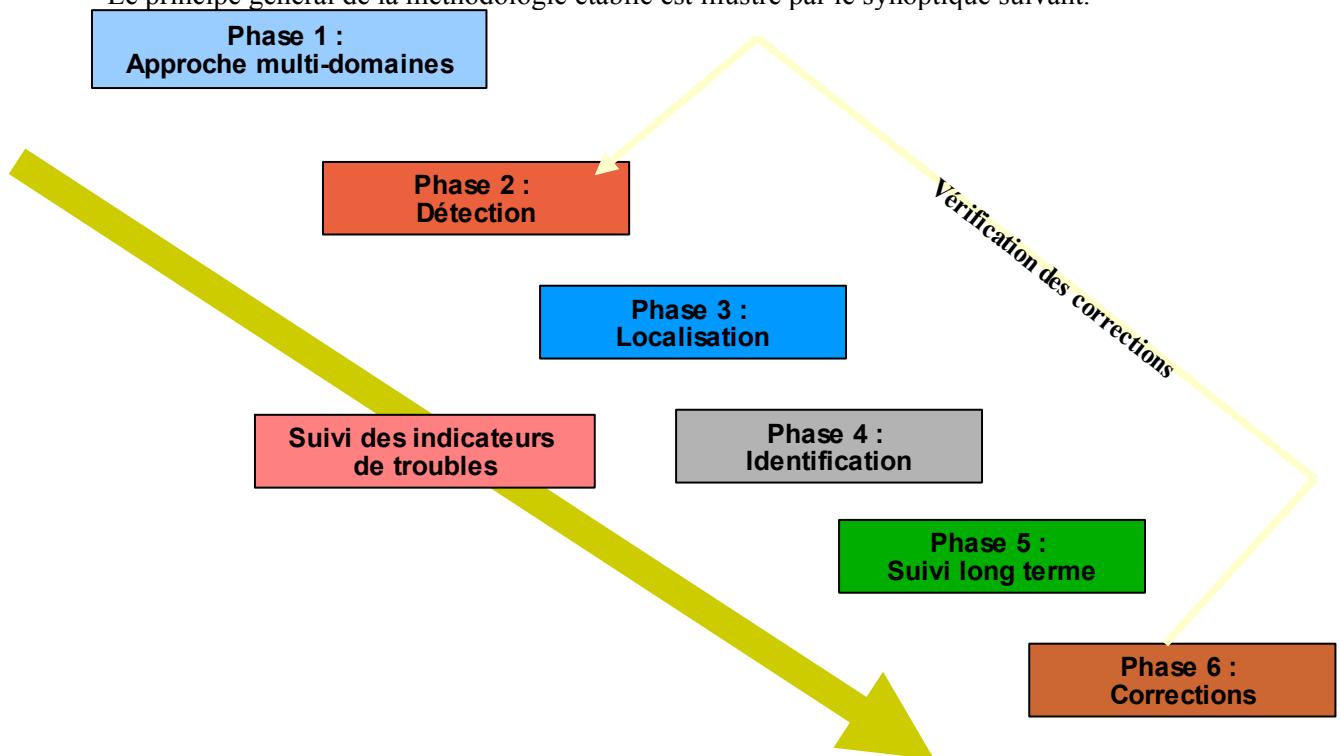


Illustration 14: Synoptique de la méthodologie de diagnostic électrique en milieu agricole

La méthodologie établie s'articule autour de 5 phases de diagnostic, une phase de correction et une phase de suivi des indicateurs de troubles de l'exploitation (problèmes).

Ce mémoire présentera uniquement les phases de diagnostic.

### 8.1 Phase 1 : Approche multi-domaines

La première étape du diagnostic électrique n'est pas une étape de mesures électriques. En effet, avant d'évaluer la présence de signaux électriques dans l'exploitation, il est important de connaître les problèmes rencontrés dans l'exploitation et d'obtenir des informations d'ordre général sur l'exploitation.

En conséquence, la première phase se décompose en deux actions. Une première action qui consiste à auditionner l'exploitant déclarant les troubles selon une démarche formalisée d'audit. La deuxième action de l'approche multi-domaines est une inspection visuelle de l'exploitation selon des axes d'observation cadrés.

### 8.1.1 Audit de l'exploitant

Cet audit permet en premier lieu de connaître les troubles rencontrés par l'exploitation et en deuxième lieu de recueillir un ensemble d'informations qui pourront être nécessaires aux personnes ayant à déployer un diagnostic électrique, zootechnique, vétérinaire dans le cadre d'une démarche multi-domaines du GPSE.

Les questions posées à l'exploitant concernent :

- la définition du ou des troubles rencontrés (19 questions),
  - exemples de questions posées à l'exploitant :
    - Quelles sont la ou les conséquences sur les animaux des troubles déclarés?
    - Depuis quand observez vous ce trouble ou les conséquences du trouble?
- l'abreuvement des animaux (10 questions),
  - exemples :
    - Quelle est la provenance de l'eau d'abreuvement des animaux?
    - Précisez le type de matière constituant les abreuvoirs?
- l'alimentation des animaux (10 questions),
  - exemples :
    - Indiquez les modes d'alimentation des animaux.
    - Quelles ont été les modifications sur l'alimentation au cours des 24 derniers mois?
- le lieu de vie des animaux (4 questions),
  - exemples :
    - Où se trouvent majoritairement les animaux en fonction des saisons?
    - Quels types de matières constituent l'aire de couchage?
- la production laitière (6 questions)
  - exemples :
    - Quels types d'automatisme effectue la traite?
    - Quel est le taux de cellules somatiques de votre troupeau?

L'investigateur, personne qui sera chargée d'appliquer cette première action ne sera pas un spécialiste des problèmes d'élevage. Ainsi, à chaque question de l'audit, des réponses types sont indiquées à l'auditeur afin de juger si la réponse donnée par l'exploitant est en accord avec la question posée et l'information attendue.

### 8.1.2 Inspection visuelle de l'exploitation agricole

La deuxième action de la phase d'approche multi-domaines est une inspection visuelle des bâtiments de l'exploitation.

Cette visite de l'exploitation permet :

- la réalisation de la cartographie de chaque bâtiment (3 questions)
- la caractérisation des bâtiments (13 questions)
  - exemple de relevé d'observations :
    - Le bâtiment est-il fait avec des armatures métalliques?
    - Quels types de sols constituent le bâtiment?
- la définition de l'environnement électrique de chaque bâtiment (6 questions),
  - exemple de relevé d'observations :
    - Lister les équipements électriques existants dans le bâtiment.
    - Quelles ont été les dernières modifications électriques du bâtiment?

- La définition de l'environnement électrique hors de l'exploitation (6 questions),
  - exemple de relevé d'observations :
    - Lister les éléments électriques existant hors de l'exploitation (au voisinage).
    - Situer ces éléments sur la cartographie de l'exploitation.

Cette inspection visuelle est principalement axée dans le domaine électrique et permet aux futurs intervenants (investigateurs) d'avoir une vision de l'environnement électrique de l'exploitation. En complément de l'inspection visuelle, des photographies doivent être prises. Afin d'orienter cette action, une banque de photographies types a été créée pour aider l'investigateur.

Dans la méthodologie de diagnostic électrique, l'environnement électrique d'une exploitation agricole est articulé autour de deux catégories. La première concernent les éléments électriques sur l'exploitation. Cela signifie que l'élément est situé dans le périmètre géographique de l'exploitation et que cet élément est de la propriété de l'exploitant.

La seconde catégorie concerne les éléments électriques hors de l'exploitation. Cela signifie qu'ils sont situés hors du périmètre géographique de la propriété de l'exploitation et/ou qu'ils ne sont pas possédés par l'exploitant. Par exemple, le réseau de distribution basse tension (BT) ou une installation électrique BT du voisinage.

### 8.1.3 Analyse de l'approche multi-domaines

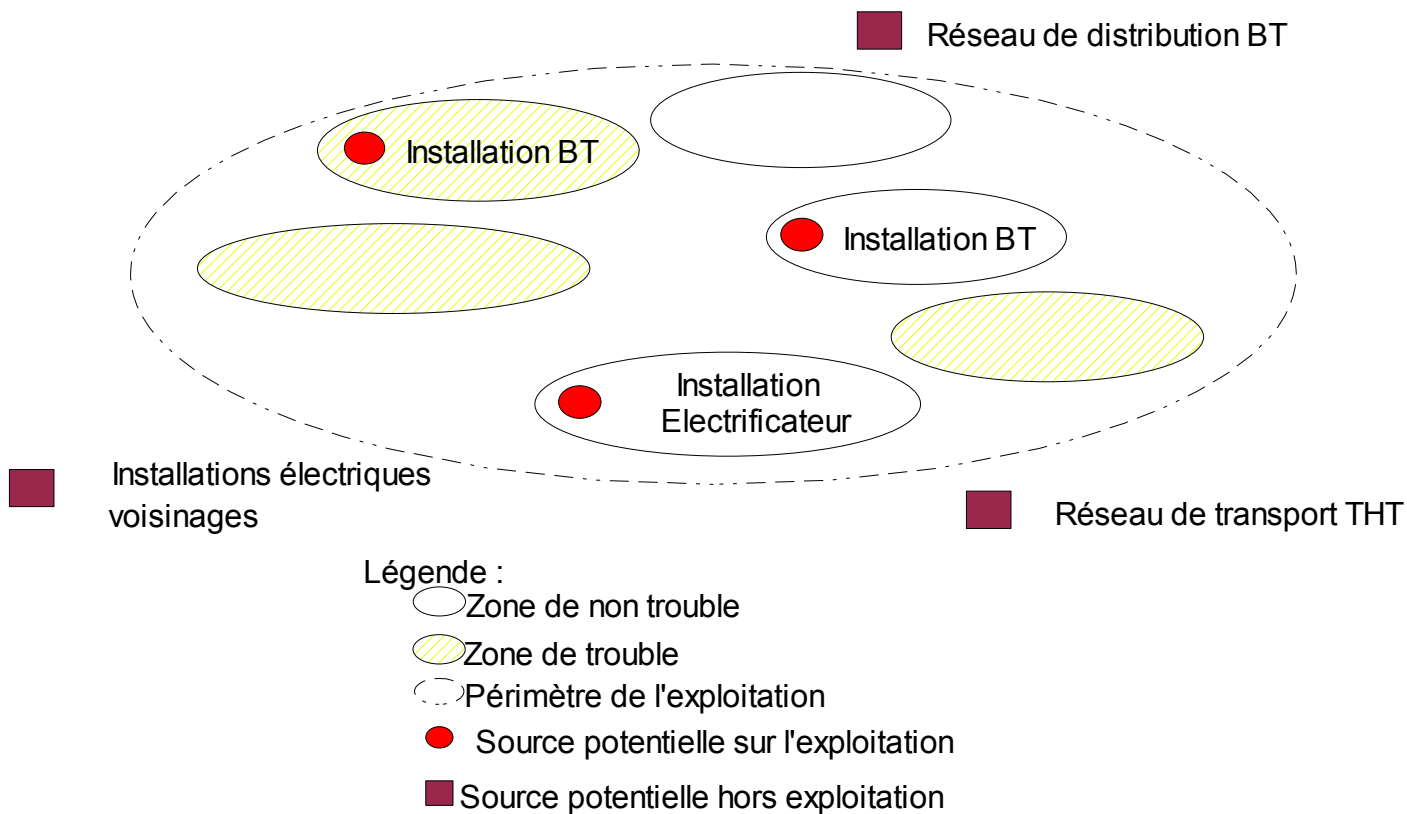
L'approche multi-domaines permet le recueillement formalisé et systématique dans les trois domaines de la démarche GPSE. Cette première phase du diagnostic peut être menée par une personne non spécialiste de la problématique agricole.

Le questionnaire d'audit et la feuille d'inspection visuelle, une fois remplis sont à diffuser à l'ensemble des intervenants des trois domaines pour une analyse individuelle.

A l'issue de l'analyse des réponses indiquées sur les deux documents, les investigateurs électriques connaîtront :

- les indicateurs de trouble à suivre tout au long de diagnostic, c'est-à-dire, les paramètres ou grandeurs mesurés ou observés qui indiquent par leurs présences ou par leur passage hors spécification l'existence d'un trouble. L'exemple classique est le taux de cellules somatiques dans le lait,
- les différents périmètres de l'exploitation dans lesquels les troubles recueillis sont observés factuellement. Ces zones sont appelées par la suite « zone de trouble »,
- les zones de non trouble, c'est-à-dire, les périmètres de l'exploitation où aucun trouble n'est observé,
- les éléments électriques présents dans le voisinage des animaux sur l'exploitation et hors de l'exploitation,

L'approche multi-domaines a pour première finalité, l'établissement d'une cartographie du type de l'illustration 15. Sur cette cartographie est représentée le périmètre géographique de l'exploitation, la synthèse des zones de troubles, de non trouble et les sources électriques sur l'exploitation et hors de l'exploitation.



**Illustration 15: Cartographie de l'approche multi-domaines**

La dernière étape de l'analyse est le choix des indicateurs d'anomalie à mesurer, paramètres mesurables qui indiquent par leur présence l'existence d'une anomalie électrique. Ces indicateurs seront mesurés dans chacune des zones de trouble et de non trouble. La détection de ces indicateurs d'anomalie est l'objet de la phase 2 de la méthodologie de diagnostic en milieu agricole.

## 8.2 Phase 2 : Détection

Tout comme l'approche multi-domaines, cette phase de détection est systématique. A chaque affaire, cette phase est à déployer. La phase de détection possède deux axes de travail :

- la détection des non-conformités des installations électriques basse tension selon les prescriptions de la norme NF C15-100.
- la détection des indicateurs d'anomalie. Ces indicateurs concernent deux grandeurs électriques : la tension et le courant.

### 8.2.1 Détection des non-conformité des installations électriques

Les installations électriques à basse tension sont régies par la norme NF C15-100. Généralement, un bâtiment agricole possède une installation électrique basse tension. Ces installations constituent ainsi une des sources principales. Il est donc important de débiter le diagnostic par un contrôle de conformité des installations électriques. Le diagnostic NF C15-100 établi spécialement pour la méthodologie comporte 6 étapes.

#### 8.2.1.1 Inspection visuelle

La détection des non-conformités débute par **une inspection visuelle** de l'installation électrique de la zone de trouble/non trouble. Cette étape a pour objet d'indiquer :

- l'état général de l'installation électrique,
- les appareillages du tableau d'alimentation et leurs caractéristiques (présence de dispositif de protection, ...),
- les caractéristiques physiques du réseau de terre (méthode de réalisation de la prise de terre,

- ...),
- la présence de liaisons équipotentielles.

### 8.2.1.2 Contrôle de la continuité du conducteur de protection

La **deuxième étape** du diagnostic NF C15-100 est la mesure de la continuité des conducteurs de protection (fils double coloration vert-jaune). La mesure de la continuité correspond à la mesure de la résistance électrique (ohms) entre un point du conducteur de protection et la prise de terre. Les courants de défaut doivent s'écouler facilement à la terre. La mesure de continuité vérifie la faible résistance du circuit de masse (conducteurs de protections) pour assurer une protection efficace. Plus la valeur est grande, moins le circuit de masse sera efficace.

La résistance maximale admissible entre toute masse et le point le plus proche de la liaison équipotentielle principale (conducteur de terre) ne doit pas être supérieure à 2 ohms, pour une installation basse tension, quelque soit le dispositif de protection et quelque soit la constitution du circuit.

Si la valeur de la résistance de continuité est supérieure à la valeur limite (2 ohms donnés par la norme UTE C15-105), la continuité entre la prise de terre de l'installation électrique et l'élément testé n'est pas considérée comme assurée. Une non-conformité est détectée et une correction doit être apportée.

Une fiche d'essais précisant le mode opératoire de la mesure, les spécifications (Résistance limite, ...), le tableau de mesure et d'analyse a été créée.

### 8.2.1.3 Contrôle de la continuité des liaisons équipotentielles supplémentaires

La **troisième étape du diagnostic** est la mesure de la continuité des liaisons équipotentielles supplémentaires, c'est-à-dire la résistance électrique entre toutes les masses conductrices présentes dans les zones de trouble/non trouble et la prise de terre. En effet, la section 7.705 de la norme NF C15-100 relative aux prescriptions particulières des installations électriques dans les établissements agricoles indique que dans les locaux où se trouvent les animaux, une liaison équipotentielle supplémentaire doit relier toutes les masses et tous les éléments conducteurs qui peuvent être touchés par les animaux. Tous les sols conducteurs doivent comporter des armatures métalliques reliées à la liaison équipotentielle supplémentaire. Les contrôles de continuité doivent donc évaluer la présence de ces liaisons et qualifier leur conformité. Une deuxième fiche d'essais a été réalisée dans ce sens. La valeur limite et le critère de non-conformité est le même que pour la mesure précédente.

### 8.2.1.4 Mesure de la résistance d'isolement

La **quatrième étape du diagnostic** des installations électriques BT est la mesure des résistances d'isolement.

L'objet de la mesure est de caractériser la résistance électrique entre les conducteurs actifs (phase, neutre) et les conducteurs de protection. Vérifier la qualité de l'isolement entre les parties sous tension et celles hors tension permet de surveiller le vieillissement progressif du matériel et prévient les risques de défauts tels que les court-circuits.

La mesure est réalisée entre les conducteurs du circuit de puissance (phase, neutre) et le circuit de masse (conducteur de protection). Sous une tension d'essai de 500 V DC, la résistance d'isolement doit être au minimum de 1 M $\Omega$ . Plus la résistance est faible, plus les risques de défauts augmentent. Le principe de la mesure est exposé sur l'illustration 16.

Lors de l'application de la fiche de mesure créée, l'investigateur doit dans un premier temps déterminer les résistances d'isolement phases-terre et neutre-terre au départ de l'installation électrique. Si une des valeurs est inférieure à la valeur minimale admissible, il faut vérifier les différentes valeurs de résistances sur chaque circuit d'alimentation afin de déterminer sur quel circuit est l'appareil avec un défaut d'isolement.

Une fois le circuit identifié, il faut vérifier les résistances d'isolement de chaque appareil de ce circuit afin d'identifier l'appareil qui présente un défaut d'isolement et donc une non-conformité.

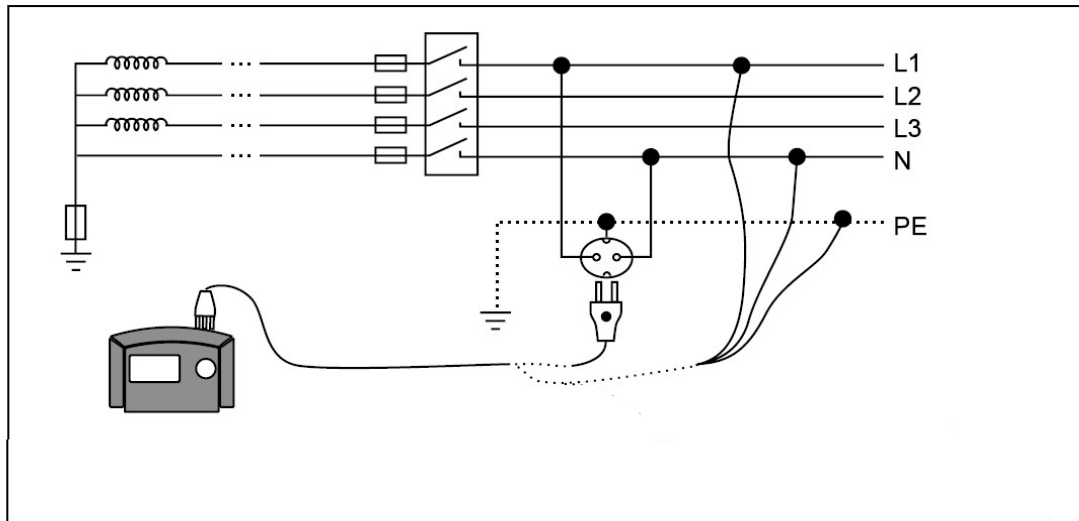


Illustration 16: Principe de la mesure de l'isolement

#### 8.2.1.5 Mesure de la résistance de la prise de terre

La **cinquième étape du diagnostic** est la mesure de la résistance de la prise de terre et la mesure de boucle de terre. la mesure de boucle de terre permet une évaluation de la terre de l'installation électrique. Il s'agit là d'une mesure par excès, car elle inclut la résistance de mise à la terre du transformateur EDF (très faible) ainsi que les résistances de lignes.

La prise de terre permet d'évacuer les courants de défaut d'une installation électrique. En conséquence, sa valeur doit être la plus faible possible. La valeur maximale admissible de la résistance dépend de la valeur du courant nominal du dispositif de protection (différentiel) présent en tête de l'installation. Classiquement, pour un différentiel de 500 mA, la valeur maximale admissible est de 100 ohms. Au delà, la prise de terre sera considérée non conforme, une correction doit être apportée.

#### 8.2.1.6 Test des protection différentielle-résiduel

La **sixième et dernière étape du diagnostic** de l'installation électrique est le test des protections différentielles-résiduelles. La section 7.705 relative aux prescriptions particulières des installations électriques dans les établissements agricoles indique que les circuits alimentant des prises de courant, quel que soit leur courant assigné, doivent être protégés par des dispositifs différentiels dont le courant différentiel-résiduel assigné n'est pas supérieur à 30 mA.

Les protections doivent être alors testées. Deux paramètres sont vérifiés, le temps de déclenchement et la valeur du courant de déclenchement.

La valeur du courant de déclenchement doit être égale à 50% de la valeur du courant de défaut nominal  $I_{\Delta N}$  indiqué sur le dispositif sous test Si le courant provoquant le déclenchement est supérieur à cette limite, le dispositif est considéré comme non conforme.

La durée maximale de déclenchement est définie à 200 ms. Si la durée mesurée lors du test est supérieure à cette limite, le dispositif est considéré comme non conforme.

### 8.2.2 Détection des indicateurs d'anomalies

Les indicateurs d'anomalies correspondent à des paramètres mesurés ou observés qui indiquent par leur présence ou par passage hors spécification l'existence d'une anomalie électrique.

Les indicateurs d'anomalies sont classés en deux catégories selon le tableau 8.

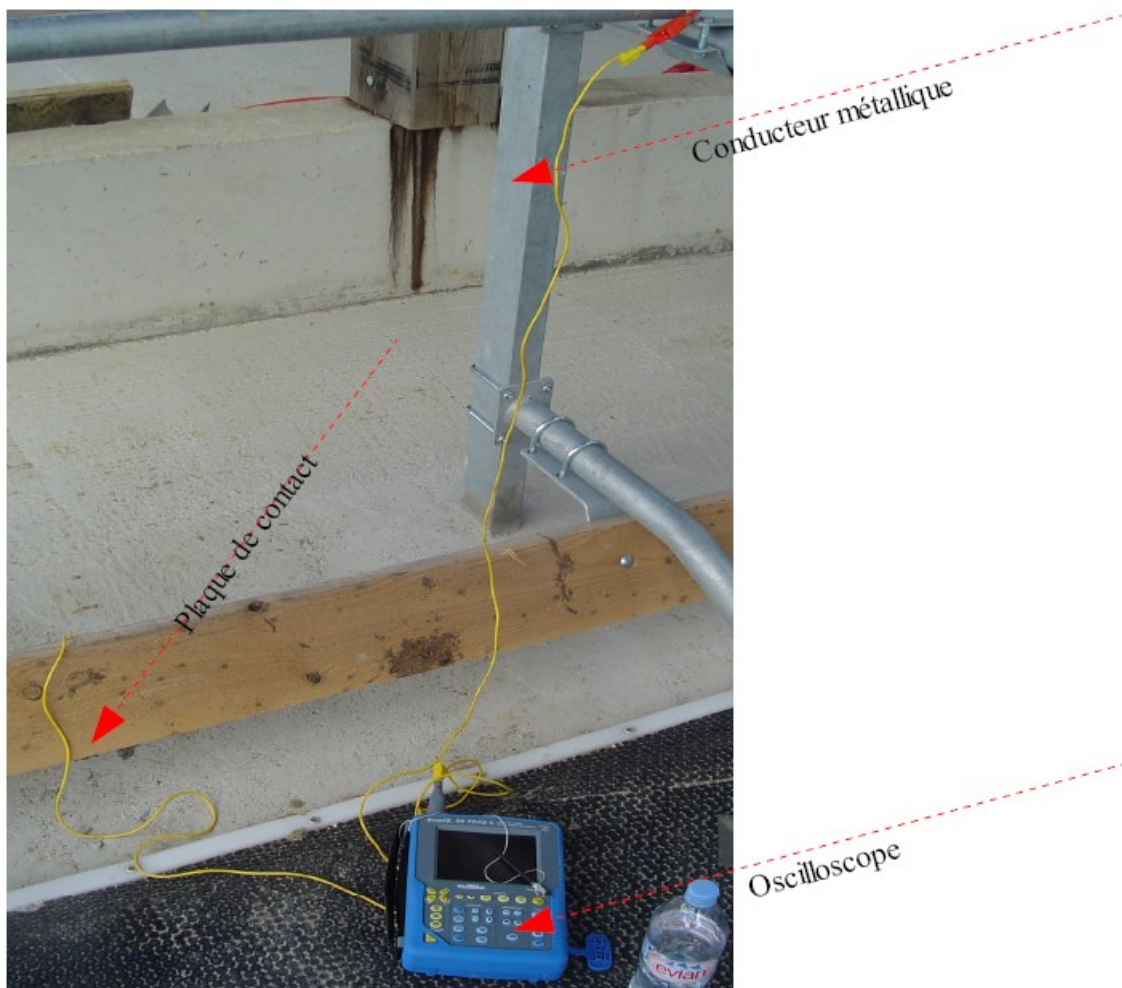
<i>Tensions</i>	<i>Courants</i>
Tension de contact en alternatif	Courant basse fréquence (DC-1kHz)
Tension de pas en alternatif	Courant haute fréquence (<100kHz)
Tension de contact en continu	

**Tableau 8 : Indicateurs d'anomalie**

La détection/mesure de ces indicateurs est réalisée dans chacune des zones de trouble/non trouble cartographiées lors de la phase 1. La mesure est réalisée dans les conditions normales d'alimentation de l'exploitation. Aucun allumage forcé ou extinction d'équipement électrique n'est à faire lors du déploiement des fiches de mesures adaptées à chaque indicateur.

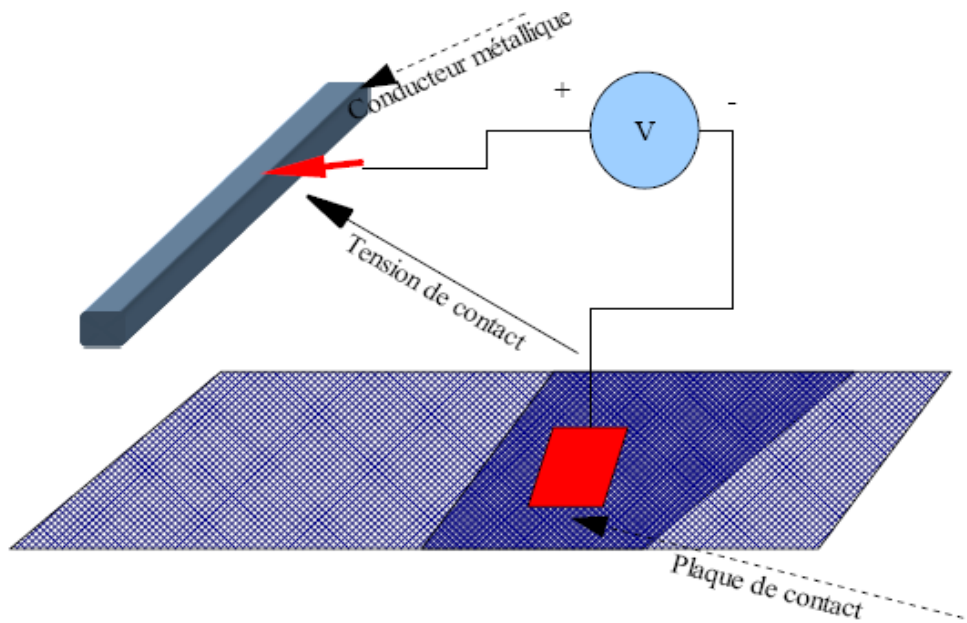
#### 8.2.2.1 Tension de contact en alternatif

Le **premier indicateur d'anomalie** est la tension de contact en alternatif réalisée selon les illustrations 17,18.



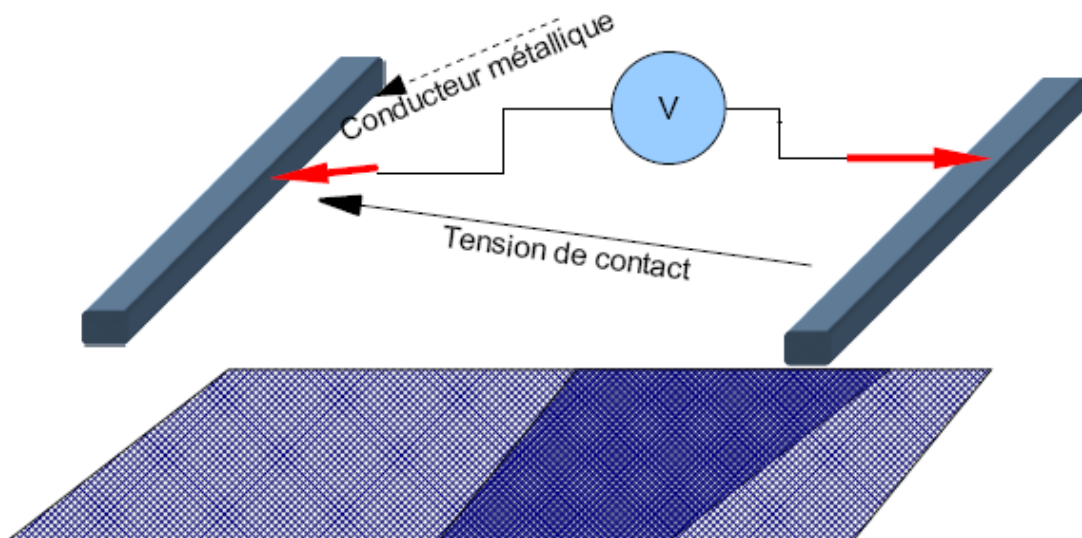
**Illustration 17: Photographie d'une mesure d'une tension de contact**

Le principe de la mesure d'une tension de contact entre un conducteur métallique et le sol est représenté sur l'illustration 18.



**Illustration 18: Principe de la mesure d'un tension de contact conducteur métallique/sol**

Le principe de la mesure d'une tension de contact entre deux conducteurs métalliques est représenté sur l'illustration 19.



**Illustration 19: Principe de la mesure d'un tension de contact entre deux conducteurs métalliques**

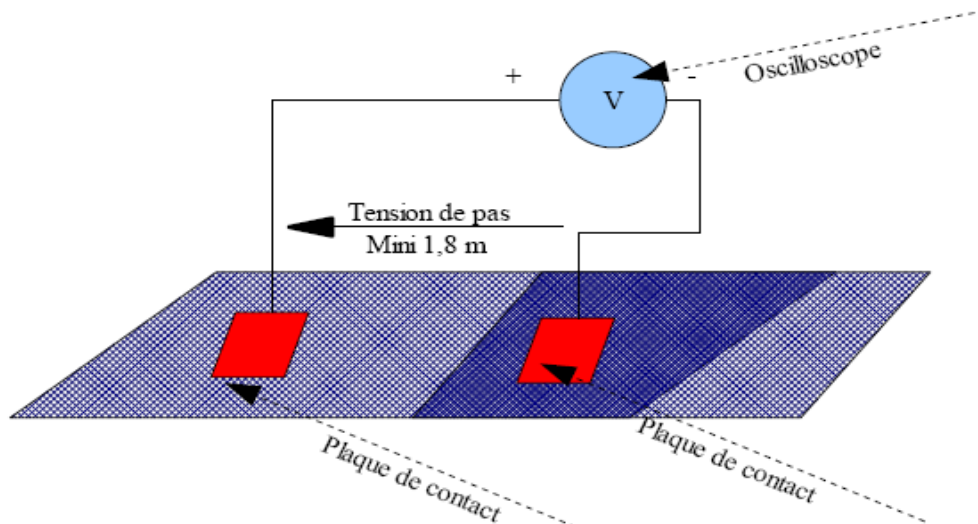
Concernant le choix des points de mesure, la fiche de mesure de la tension de contact donne d'une part une liste de points de mesure type et d'autre part une orientation technique pour le choix des points. Les points de mesures devront être positionnés au niveau des zones où les animaux entrent en contact avec des conducteurs métalliques. En effet, les différentes expertises ont montré que les animaux peuvent être exposés à des tensions parasites aux points stratégiques pour un élevage (abreuvement, alimentation, traite). Les mesures sont donc à réaliser soit entre conducteurs métalliques (cornadis, barrières métalliques, ...), soit entre un conducteur métallique et le sol.



### 8.2.2.2 Tension de pas en alternatif

Le **deuxième indicateur d'anomalie** à mesurer est la tension de pas dans chacune des zones identifiées en phase 1.

Le principe de la mesure d'une tension de pas est représenté sur l'illustration 20.



**Illustration 20: Principe de la mesure d'une tension de pas**

L'écartement entre les deux plaques de contact doit être équivalent à l'écartement entre les membres antérieurs et postérieurs d'une vache (1,8 m environ).

Les points de mesures devront être positionnés au niveau des changements de nature du sol que peuvent rencontrer les animaux lors de leur circulation. En effet, les différentes expertises ont montré que le changement de la nature de sol fait généralement naître une différence de potentiels (ddp) ou tension de pas significative. Par exemple, le passage d'un sol bétonné ferrailé vers un sol bétonné non ferrailé ou encore le passage d'un sol en terre battue vers un sol bétonné.

Dans le cas de mesures dans une zone de couchage, de stabulation, d'attente, 3 mesures de tensions de pas réparties sur la surface de la zone doivent être réalisées afin de détecter si une partie de cette zone est plus exposée à une anomalie électrique.

Pour les deux premiers indicateurs, des critères ont été spécifiés afin que l'investigateur puisse dire si la mesure est significative d'une anomalie électrique. Les mesures sont considérées significatives si les deux critères suivantes sont vérifiées :

- la valeur de la tension crête-crête mesurée est au minimum 20 mV,
- la forme d'onde est visuellement reconnaissable.

Le fait que la mesure soit significative indique seulement qu'il existe une anomalie électrique qui a fait naître à l'intérieur de la zone de mesures des tensions parasites. L'identification de la source n'est pas réalisée lors de cette étape de détection d'anomalie. En conséquence, les niveaux mesurés dans cette fiche ne peuvent pas qualifier l'éventuel stress électrique subi par les animaux.

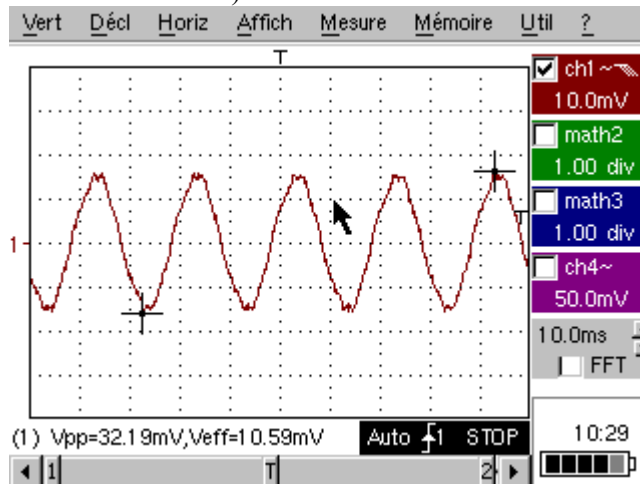
### 8.2.2.3 Tension de contact en continu

Le **troisième indicateur d'anomalie** est la tension de contact en continu. La tension de contact en continu (DC) ne peut être mesurée qu'entre deux conducteurs métalliques que l'animal peut toucher simultanément. L'état de connaissance actuel ne permet pas d'affirmer de la justesse des autres mesures. Le principe de mesure est comparable au principe exposé sur l'illustration 20.

### 8.2.2.4 Courants de fuite

La **quatrième et le cinquième indicateur d'anomalie** concerne le courant de fuite sur les prises de terre. Deux mesures sont effectuées : la première en basse fréquence de 48Hz à 1kHz., l'autre plus haut en fréquence jusqu'à 100kHz. Cet indicateur permet de vérifier l'absence de courant de fuite (BF et HF) de l'installation électrique en fonctionnement normal.

Par exemple, lors de la mise en application de la phase 2, un investigateur a obtenu l'oscillogramme en illustration 21. L'analyse de la mesure conclue que le signal mesuré est significatif (il dépasse les 20 mV crête-crête, forme d'onde sinusoïdale 50Hz).



**Illustration 21: Exemple d'oscillogramme en tension de pas**

Cela signifie qu'il existe une source comportant une anomalie et qu'elle est localisée soit sur l'exploitation, soit hors de l'exploitation. Il faudra localiser la source de cette anomalie, c'est-à-dire, indiquer si elle est sur ou hors de l'exploitation et si elle est sur l'exploitation dans quelle zone de trouble/non trouble est la source.

A l'issue de la détection des indicateurs d'anomalie, l'investigateur saura s'il existe une anomalie sur l'exploitation ou hors de l'exploitation ayant un impact (tension ou courant) sur la zone de trouble/non trouble dans laquelle il a effectué les mesures.

## 8.3 Phase 3 : Localisation de la source

Cette phase est réalisée s'il y a eu détection d'indicateurs d'anomalie en phase 2. Dans ce cas, à partir de la mesure de ces indicateurs d'anomalie, on va déterminer la localisation de la source qui a provoqué cet indicateur.

La phase de localisation va être menée en trois temps :

- 1- tout d'abord, l'investigateur regarde si la source est sur ou hors de l'exploitation. Le moyen employé est la mise hors tension de l'ensemble des installations électriques basse tension de l'exploitation. Deux cas se présentent alors.
  - A- si, le signal de l'indicateur d'anomalie dont on veut localiser la source disparaît, cela signifie que la présence de l'indicateur est liée à l'alimentation de l'installation électrique basse tension de l'exploitation et donc la source est sur l'exploitation. Il reste donc à savoir dans quelle zone de trouble/non trouble se situe la source.
  - B- si le signal de l'indicateur d'anomalie dont on veut localiser la source reste malgré la mise hors tension alors, la source est hors de l'exploitation.
- 2- si la source est sur l'exploitation, la méthodologie prévoit ensuite de mettre hors tension l'installation électrique de la zone de mesure en cours.
  - Si le signal de l'indicateur disparaît, alors la source de l'anomalie est dans la zone de

mesure en cours.

- Si le signal de l'indicateur reste présent, alors la source est présente dans une autre zone de l'exploitation. La troisième étape de la localisation permet alors d'identifier cette zone
- 3- si la source est dans une autre zone de l'exploitation, il faut mettre tour à tour l'ensemble des installations électriques des différentes zones sous tension puis hors tension pour déterminer de quelle alimentation BT dépend la présence de l'indicateur d'anomalie.

A l'issue de la phase de localisation, l'investigateur sait dans quelle zone de trouble/non trouble se situe la source dans le cas d'une source sur l'exploitation. Dans le cas inverse, les sources sont hors de l'exploitation et concernent le réseau de transport d'électricité, le réseau de distribution ou les installations électriques du voisinage.

La phase 4 d'identification dépend de la localisation de la source. En fonction de cette localisation, les méthodes établies pour l'identification sont différentes.

## 8.4 Phase 4 : Identification

### 8.4.1 Cas de la source hors de l'exploitation

Dans le cas d'une anomalie dont la source est hors de l'exploitation, les origines possibles sont :

- le réseau de transport d'électricité,
- le réseau de distribution,
- les installations électriques du voisinage.

#### 8.4.1.1 Réseau de transport d'électricité

Pour identifier si le signal de l'indicateur d'anomalie (par exemple, une tension de pas) est généré par le réseau de transport d'électricité, la méthodologie employée pour l'identification est composée de deux solutions.

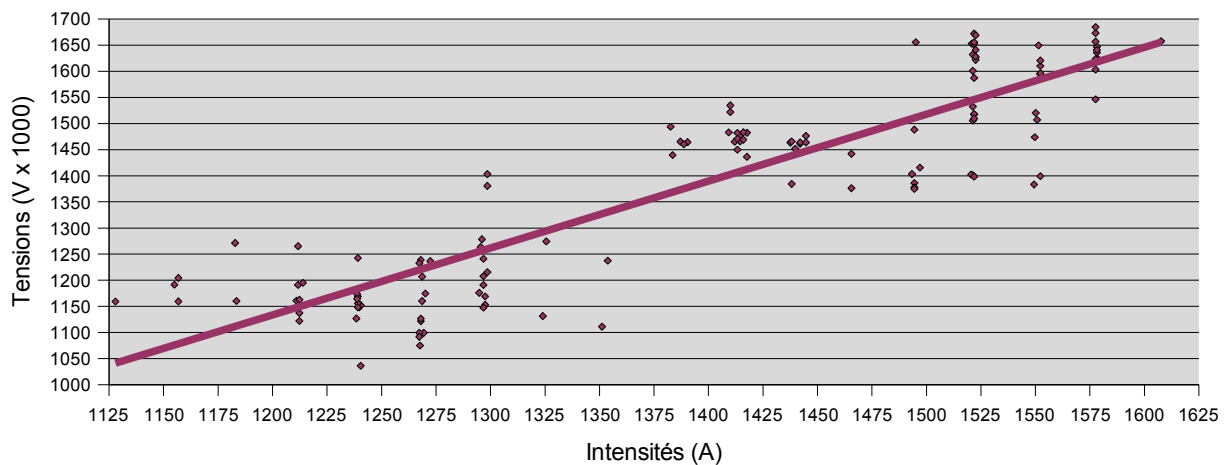
- La première solution pour évaluer la responsabilité du réseau de transport sur la création de tension parasite est de travailler au niveau du pylône au voisinage de l'exploitation. Cette méthode est réalisée par les experts de RTE. Elle consiste à mesurer les courants écoulés en permanence par la prise de terre du pylône et à déterminer la taille de la zone d'influence du pylône. Celle-ci correspond à la distance au delà de laquelle les courants écoulés dans le sol ne provoquent plus de tensions parasites. Ainsi, plus la zone d'influence est grande, plus l'exploitation est susceptible d'être exposée à des tensions parasites dont l'origine est le réseau de transport.
- La deuxième consiste à suivre dans le temps l'évolution de la tension de pas ou de contact supposée être issue du réseau de transport d'électricité. A l'issue de la période de suivi, l'investigateur superpose le graphe de l'évolution de la valeur efficace ou crête de la tension de pas au graphe de l'intensité circulant dans la ligne du réseau de transport. Cette méthode permet d'estimer si une augmentation de l'intensité dans les lignes s'accompagne d'une augmentation de la tension parasite.

Cette deuxième solution nécessite l'acquisition des signaux électriques dans l'exploitation. L'acquisition des tensions de pas/contact doit comporter au minimum 2 points de mesures dans la zone de trouble/non trouble et au maximum 8. La position de ces points peut être connue lors des phases de diagnostic antérieures.

La durée d'acquisition des tensions pour la corrélation avec la variation du courant doit être de 24 heures pour l'analyse optimale du degré de corrélation entre les deux paramètres (tensions, courants). RTE fournit un fichier comportant les intensités mesurées toutes les 10 minutes dans les lignes THT durant la période de corrélation.

Un graphique peut être utilisé pour évaluer la corrélation entre le transit de la ligne et les niveaux de tensions dans l'exploitation (Illustration 22). Sur l'axe des abscisse, l'intensité (A) y est représentée. Sur l'axe

des ordonnées, il s'agit du niveau de tensions (V x 1000).



**Illustration 22: Droite de régression**

La droite de régression a été tracée. Le coefficient de corrélation nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire (sous forme d'une droite) entre les deux grandeurs considérées. Une bonne corrélation ( $>0,6$ ) entre deux grandeurs peut révéler une relation de cause à effet entre elles. Dans notre problématique, cela signifie que si le degré de corrélation est fort, le réseau de transport est à l'origine de l'indicateur d'anomalie détecté (tensions de pas ou de contact). Dans le cas présenté, le degré de collaboration entre l'intensité dans la ligne et le niveau de la tension est de 0,9, on peut donc supposer que le réseau est à l'origine de l'indicateur d'anomalie (tensions de pas/contact).

#### 8.4.1.2 Réseau de distribution

Pour identifier si le signal de l'indicateur d'anomalie (par exemple, une tension de pas) est généré par le réseau de distribution, la méthodologie employée pour l'identification est composée de deux solutions comparables aux deux solutions utilisées pour le réseau de transport.

- La **première solution** permet de quantifier sur quelle distance (zone d'influence), les courants écoulés peuvent provoquer une augmentation du potentiel du sol et par conséquent des tensions parasites.
- La **deuxième** consiste à suivre dans le temps l'évolution de la tension de pas ou de contact supposée être issue du réseau de distribution. A l'issue de la période de suivi, on superpose le graphe de l'évolution de la valeur efficace ou crête de la tension de pas au graphe de l'intensité dérivé par la mise à la terre du neutre. Cette méthode permet d'estimer si une augmentation de l'intensité dans la mise à la terre du neutre s'accompagne d'une augmentation de la tension parasite ou inversement.

#### 8.4.1.3 Installations électriques au voisinage

La dernière identification concerne les installations électriques au voisinage. D'abord, la première méthode est la déduction possible des deux précédentes étapes d'identification. Si les deux précédentes étapes ont conclu sur l'origine des indicateurs, il est peu probable que les installations électriques du voisinage, parfois très éloignées de l'exploitation puissent être responsables des tensions parasites. Dans le cas contraire où les deux premières étapes n'ont pas identifié la source parmi le réseau de transport et de distribution, il faut alors engager une nouvelle phase de mesure autour des bâtiments du voisinage.

#### 8.4.2 Cas de la source sur l'exploitation

Dans le cas d'une anomalie dont la source est sur l'exploitation et interne à une des zones de troubles, la phase d'identification doit permettre de trouver quel appareil de l'installation basse tension génère le signal parasite. La méthodologie consiste à mesurer l'indicateur de trouble (tension de pas, de contact, courant de fuite) en fonction des mises sous et hors tensions des équipements.

## 8.5 Suivi électrique long terme

Cette cinquième phase ne rentre plus dans le cadre du diagnostic rapide. En effet, cette phase permet par le suivi long terme des indicateurs d'anomalie de vérifier qu'il n'existe pas d'anomalie non détectée lors des phases précédentes. Cette phase va suivre les évolutions des niveaux électriques dans le temps et vérifier qu'aucun autre signal non identifié n'apparaît. La durée de cette phase peut atteindre plusieurs mois.

A titre d'exemple, lors de l'audit, l'exploitant a pu déclarer que les comportements de stress des animaux sont plus multipliés en période humide. La phase 5 va venir examiner si lors des périodes de pluie, les niveaux de tensions ont augmenté et si cette augmentation peut expliquer l'accroissement de nervosité du troupeau. La phase 5 dans ce cas pourra durer plusieurs mois.

A l'issue de la phase 4 d'identification et/ou de la phase 5 du suivi long terme, des corrections peuvent être apportées :

- soit sur la source de l'anomalie dans le cas de :
  - non conformités à la norme NF C15-100,
  - d'anomalies ou de défauts électriques au niveau d'un équipement.
- soit au niveau du réseau de distribution,
- soit sur la structure du bâtiment en apportant une équipotentialité au niveau des bétons et des armatures métalliques.

Les méthodes correctives ne seront pas abordées dans ce document. Des études visant à améliorer les méthodes correctives ont été engagées en support du déploiement de la méthode sur le terrain. Ces études sont décrites dans la section 10 du présent document.

## 9 Moyens de mesures et mode opératoire

### 9.1 Moyens de mesures

Les moyens de mesures nécessaires au déploiement de la méthodologie ont été sélectionnés.

Un oscilloscope a été choisi pour la mesure et la visualisation des indicateurs d'anomalies. Cette appareil doit disposer d'au moins une voie différentielle. Il permet ainsi le relevé des indicateurs de troubles. La bande passante de l'oscilloscope est de 200kHz.

Dénomination générique	Spécifications techniques minimales	Moyens sélectionnés
<b>Oscilloscope</b>	1 voie en entrée différentielle	Metrix OX7042C
	Bande passante : 200 kHz	
	Calibre vertical minimal : 5 mV/DIV	
	Calibre horizontal minimal : 500µs/DIV	
	Convertisseur AN : 12 bits	
	Fréquence d'échantillonnage : 2 Géc/s	

Deux sondes de courant ont par ailleurs été sélectionnées. Une première qui permet la mesure de courant basse fréquence (48-1kHz) avec le plus petit courant détectable à 500 µA. La rapport de conversion courant-tension est de 1volt par A. La deuxième sonde utilisée travaille dans une gamme de fréquence plus étendue (DC-100kHz) avec le plus petit courant détectable à 10 mA. Le rapport de conversion est de 100 mV par A.

<b>Sonde de courant basse fréquence</b>	Calibre courant/tension : 1V/A	Chauvin Arnoux B102
	Bande passante : 48Hz-1kHz	
	Gamme de courant : 500µA-100A	
	Capacité d'enserrage : 112 mm	

<b>Sonde de courant haute fréquence</b>	Calibre courant/tension : 100mV/A	LEM PR30
	Bande passante : DC-100kHz	
	Gamme de courant : 10mA-30A	
	Capacité d'enserrage : 20 mm	

Pour les contrôles de la NF C15-100 de la phase 2 (détection), un testeur d'installation électrique a été sélectionné. Il concentre l'ensemble des fonctions nécessaires au contrôle NF C15-100 en un seul appareil.

<b>Testeur d'installations selon NF C 15 100</b>	Mesure des résistances des continuités	Chauvin Arnoux CA6115
	Mesure des résistances des prises de terre	
	Mesure des résistances de boucle	
	Test des protections différentielles	

Le dispositif d'acquisition des signaux électriques a été développé lors de stage d'étude. En effet, les appareils du marché, très coûteux, ne disposent des fonctionnalités nécessaires aux phases d'identification et de suivi long terme. Ce dispositif est décrit en section 10.

<b>Dispositif d'acquisition</b>	Bande passante 100 KHz	Plate-forme d'acquisition (CAN + Programmation Labview)
	Taux d'échantillonnage monovoie : 250kéch/s	
	Nombre de voies différentielles: 8	
	Niveau d'entrée maximal : 10 Volts	
	Calibre vertical minimal : 5 mV/DIV	

## 9.2 Exemple de mode opératoire

La méthodologie de diagnostic comprend la démarche, les moyens techniques et aussi les modes opératoires :

- pour chaque mesure d'indicateurs d'anomalie :
  - tension de pas alternative,
  - tension de contact alternative,
  - tension de contact continue,
  - courant basse fréquence alternatif,
  - courant haute fréquence alternatif,
- pour chaque test du contrôle NF C15-100 :
  - continuité des conducteurs de protection,
  - résistance de la prise de terre,
  - test des dispositifs à courant différentiel-résiduel.

A titre d'exemple, le mode opératoire pour la mesure d'une tension de pas alternative est exposé en annexe 1.

## 10 Etudes techniques, support de la méthodologie

La méthodologie de diagnostic établie ne peut être efficace sur le terrain que si elle est complétée d'un ensemble d'études permettant d'améliorer d'une part les connaissances sur les phénomènes électriques en milieu agricole et sur les méthodes correctives à employer et d'autre part, d'améliorer les moyens et les méthodes de diagnostic ou de mesures.

Ces deux aspects ont été développés au travers de projets et de stages sur lesquels plusieurs étudiants de l'Université de Limoges ont participé.

### 10.1 Amélioration des connaissances

#### 10.1.1 Etat de l'art des systèmes passifs pour la réduction des courants électriques émis par les machines électriques

Lors des expertises en milieu agricole, des mesures de tensions sont réalisées entre deux parties métalliques que peut toucher un animal simultanément. Un exemple de relevé est exposé en illustration 23.

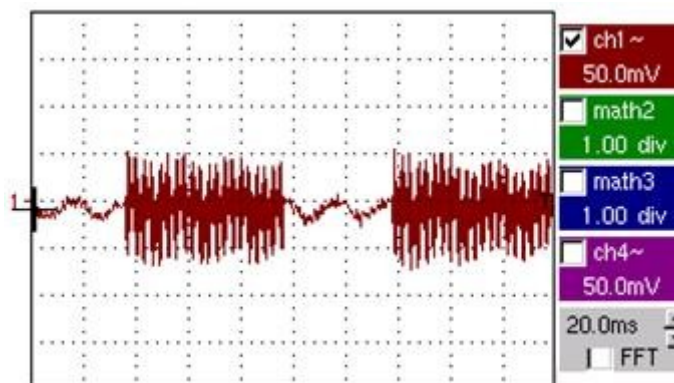


Illustration 23: Exemple de relevé en exploitation agricole

Sur ce relevé, un signal 50 Hz avec un niveau de 25 mV crête à crête est détecté, mais également d'autres parasites avec des pics supérieurs à ce niveau. Ces parasites transitoires sont dus aux machines électriques, moteurs, ...

Les recherches à mener concernent la définition de solutions de protection afin de limiter les parasites électriques générés par les équipements basse tension sur le câble de terre.

Les études ont dans un premier temps permis de sélectionner et de valider deux moyens de mesures basés sur les sondes de courants. Le premier est une sonde de courant Chauvin Arnoux B102 (calibre 1V/A, bande passante 1kHz) et le deuxième, une sonde de courant LEM PR30 (calibre 100mV/A, bande passante 100 kHz).

A partir des moyens de mesure validés, la couverture spectrale de parasite émis sur le conducteur de terre a été étudiée afin de connaître dans quelle bande de fréquence les dispositifs de protection doivent fonctionner.

L'état de l'art des protections passives a permis de sélectionner :

- Self bobinée sur tore (tore philips),
- Filtre de terre (ground transient filter),
- Self de déparasitage.











Les essais menés en 2007 par Nicolas Violet ont eu pour objectifs :

- la vérification à la conformité NF-C15100 des dispositifs. La conformité électrique des dispositifs de filtrage suite à un courant de défaut 50Hz de quelques ampères (< 2A) a été contrôlée.
- la caractérisation des dispositifs en puissance. La caractérisation des dispositifs a été réalisée en sinus point à point dans la bande passante DC-30KHz (limites de l'amplificateur de courant) afin d'obtenir la courbe de l'atténuation du courant en fonction de la fréquence.

Pour chaque dispositif, les fréquences de coupure ont été déterminées. Egalement, tous les dispositifs sont conformes et laissent passer un courant de défaut 50Hz sans atténuation.

Les actions à venir dans cette étude concernent la poursuite de l'état de l'art et des essais de nouveaux dispositifs d'essais. Une implantation d'un dispositif dans une ferme est prévue courant l'été 2007 afin de valider définitivement le choix du dispositif.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2005/2006	Mickaël Omer Cyril Patrouilleau (ENSIL)			
Stage 2005/2006	Yannick Collet (ENSIL)			
Projet 2006/2007	Nicolas Violet Bruno Mandonnet (Licence GPI)			
Stage 2006/2007	Nicolas Violet (Licence GPI)			

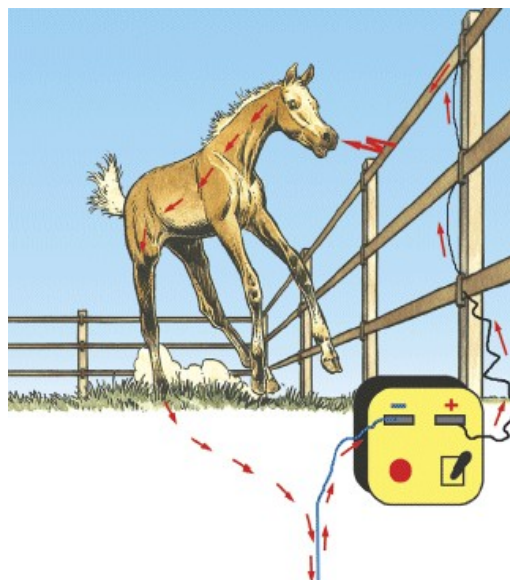
### 10.1.2 Etude des courants de retour des clôtures électriques

Dans certaines exploitations agricoles, les impulsions électriques des électrificateurs de clôtures sont retrouvées dans les salles de traite lors d'expertises électriques.

Une étude a donc été lancée afin de répondre aux objectifs suivants :

- comprendre le fonctionnement des électrificateurs de clôtures,
- mettre en évidence les perturbations générées lors d'une installation de clôture,
- définir des méthodes et des moyens pour réduire les perturbations ou l'impact des clôtures sur les installations agricoles.

Les travaux 2005-2006 ont d'abord établi une bibliographie détaillant le principe de fonctionnement de la clôture électrique. La clôture électrique constitue un circuit dans lequel circule un courant lorsqu'elle est fermée par un animal. En effet, lors d'un contact, ce courant est transmis à l'animal ou à la végétation pour ensuite revenir à l'appareil par le biais du système de mise à la terre de l'électrificateur. (Illustration 24)



**Illustration 24: Principe d'une clôture électrique**

L'état de l'art a également permis de comprendre des phénomènes de couplage des clôtures électriques sur les installations agricoles. Deux types de couplages sont majoritairement responsables des tensions transitoires détectées lors des expertises : le couplage des prises de terre, le couplage capacitif entre le fil et le sol.

En théorie les courants transitoires de la prise de terre n'existent dans le sol que lorsque le circuit est fermé par un animal. Or le phénomène de la capacité parasite entre le sol et le câble métallique de la clôture induit en permanence un courant qui va rejoindre la prise de terre par le sol. Le chemin de retour pris par ce courant n'est pas maîtrisable. Par conséquent, ce courant peut affecter les bâtiments même éloignés de toute prise de terre d'un électrificateur ou bien éloignés d'une clôture électrique.

Une expérimentation a été menée pour mettre en évidence les couplages précédents grâce à l'installation d'une clôture électrique.

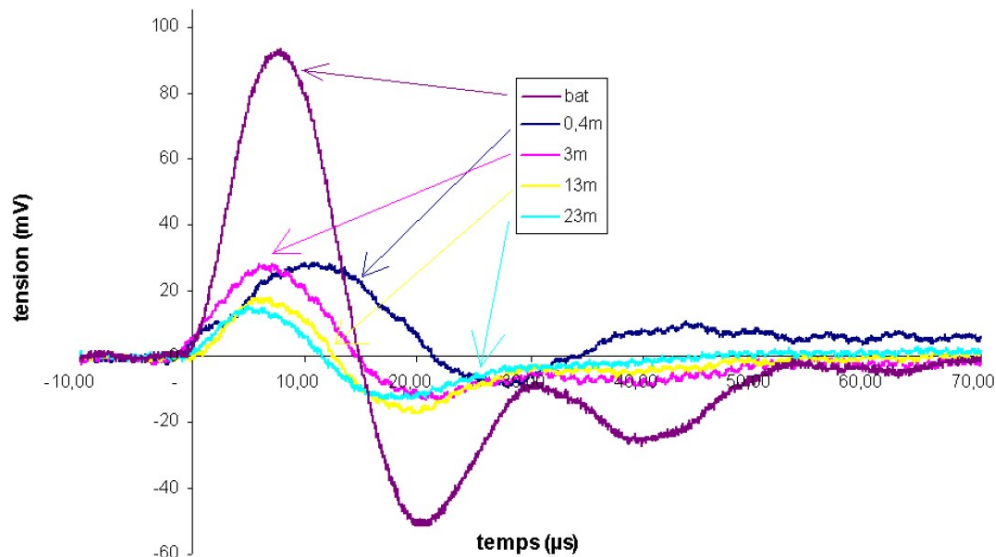
Dans un premier temps, l'influence de la clôture sur le sol par la présence d'un dôme de potentiel a été mise en valeur par la mesure autour de la prise de terre. Une cartographie de potentiel a été réalisée en mesurant le potentiel du sol par rapport au potentiel de la prise de terre.

La variation forte du potentiel du sol peut poser des problèmes de stress des animaux. Des mesures de tensions de pas ont mis en évidence que l'animal peut être soumis à près de 8 volts transitoire lorsqu'il est situé entre 0 et 1 mètre de la prise de terre.

Dans un deuxième temps, une étude sur l'influence des clôtures sur les bâtiments a été menée. Pour

détecter l'impact de la clôture sur le bâtiment, le signal reçu sur la prise de terre d'un bâtiment a été étudié.

Les résultats de cette étude (illustration 25) montrent qu'un éloignement entre les deux prises de terre réduit l'impact de l'électrificateur. De plus une stabilité de l'impact de l'électrificateur est obtenue lorsque la distance des deux prises de terre atteint 10 mètres. Il ne faut en conséquence jamais connecter la prise de terre de l'électrificateur sur la prise de terre électrique du bâtiment ou positionner la prise de terre de l'électrificateur proche de la prise de terre électrique du bâtiment.



**Illustration 25: Impact de l'électrificateur de clôture sur la prise de terre des bâtiments**

Au final, cette étude a montré qu'il sera très difficile de réduire l'impact de ces courants en travaillant sur l'électrificateur. Des solutions d'équipotentialité sont donc à développer si l'on souhaite immuniser les bâtiments agricoles aux courants transitoires des électrificateurs de clôtures.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2006.

Projet 2005/2006	Nicolas Mounié Jean Jacques Chimène Vincent Lavalette (Licence GPI)	☹️☹️☹️	☹️☹️	
Stage 2005/2006	Jean-Jacques Chimène (Licence GPI)	☹️☹️☹️	☹️☹️☹️	☹️☹️☹️

### 10.1.3 Développement de solutions d'équipotentialité et définition des règles de construction des bâtiments agricoles exposés à des courants vagabonds dans le sol.

Les courants de fuite issus des machines électriques, ou les courants vagabonds générés par les clôtures créent sur leurs passages des différences de potentiels qui au delà d'un certain seuil peuvent représenter une gêne pour l'animal.

Cette étude a pour objectif :

- d'étudier la propagation des courants vagabonds ou de fuite dans le sol,
- de rechercher des solutions de réduction des différences de potentiels à l'intérieur des bâtiments agricoles par la création de liaisons et de surfaces équipotentielle,
- de développer des solutions d'immunisation des bâtiments par la pose d'un système de prise de terre extérieur au bâtiment.

Une maquette a été réalisée afin de reproduire un site agricole avec des courants vagabonds. Elle a pour dimensions 250 cm de longueur, 140 cm de largeur et 100 cm de profondeur (Illustration 26 et 27). Il a été choisi de remplir le bac de sable pour avoir un sol homogène et modelable facilement. Tout au long de l'étude, un courant sera injecté grâce aux deux piquets d'injection. C'est un courant constant de 4mA efficace et de fréquence 50Hz.

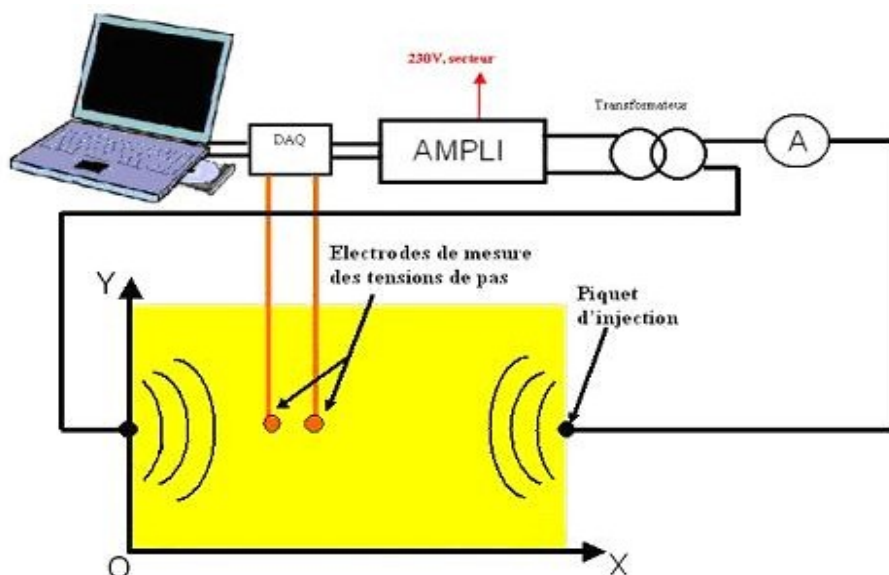


Illustration 26: Synoptique du banc d'essai

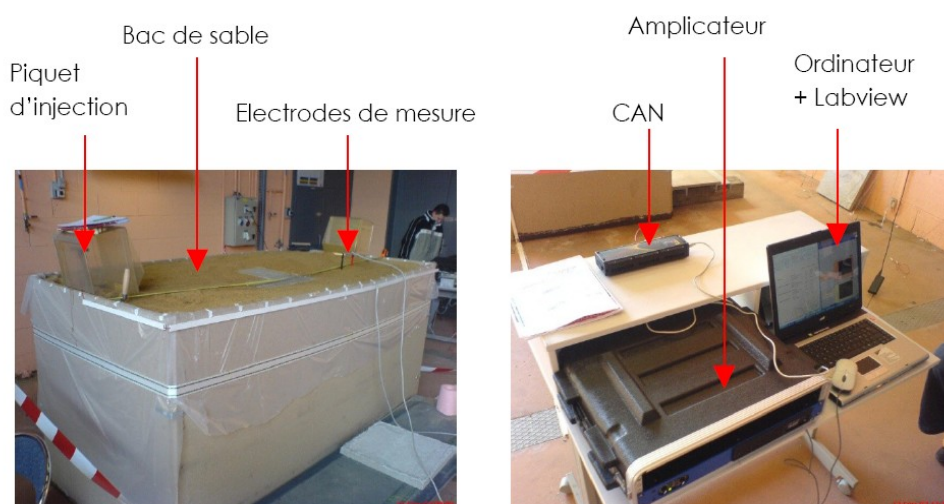


Illustration 27: photographie du banc d'essais ainsi que la partie injection et acquisition

Ainsi, le banc d'essai permet de comparer et de vérifier objectivement l'efficacité et la validité des différentes solutions mises en œuvre pour diminuer l'impact des courants vagabonds sur un bâtiment agricole. Une ensemble de dispositifs a pu être testé (boucle en fond de fouille, plan incliné, treillis, rainures).

Par exemple, deux dalles différentes de 35x35 cm sont disposées dans le banc d'essais. Le but de cette manipulation est de réduire les différences de potentiels au niveau de la transition entre les deux dalles (par solution du rainurage) au niveau des transitions sable / dalle (par solution des plans inclinés) et aussi de canaliser les courants autour des dalles bétonnées (par l'utilisation d'un grillage ceinturant le site à protéger).

L'illustration 28 montre l'implantation des divers éléments.

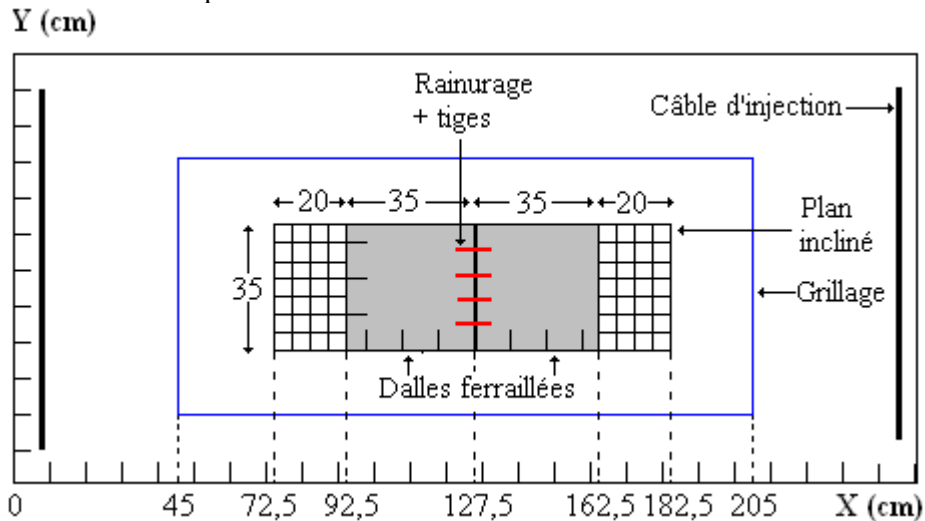


Illustration 28: Implantation des solutions

L'illustration 29 donne l'évolution longitudinale de la tension de pas (15 cm) en présence de l'ensemble des dispositifs.

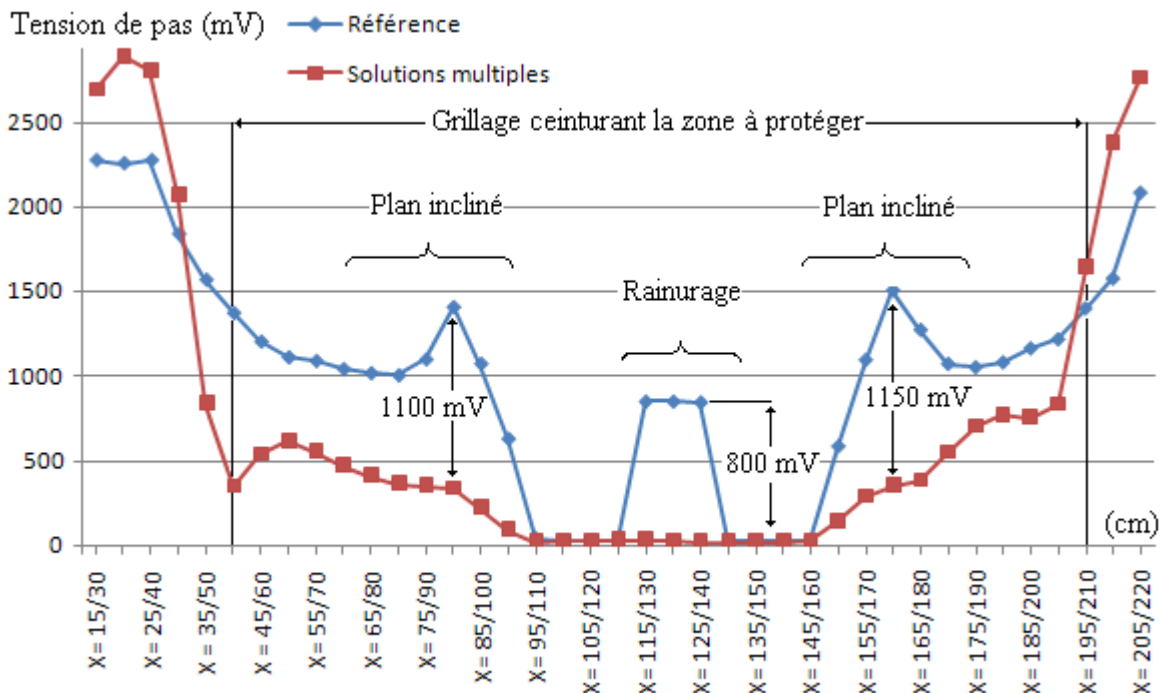


Illustration 29: Effet des dispositifs testés

Sur les courbes de l'illustration 29, nous pouvons observer les effets des dispositifs mises en place.


















En effet, le rainurage supprime la différence de potentiel au niveau de la transition entre les deux dalles. Les plans inclinés permettent quant à eux de réduire fortement les DDP au niveau des transitions

sable / béton et béton / sable correspondant aux entrées et sorties des bâtiments agricoles. Pour finir le grillage permet de réduire les niveaux de courants dans la zone qu'il entoure.

Après des manipulations qui ont considéré le sol homogène et isotrope, un nouveau banc d'essai sera construit pour analyser la propagation du courant dans un sol bi-couches et dans un sol en présence de zone aquifère.

L'ensemble des résultats expérimentaux seront comparés à ceux obtenus par simulation du banc d'essai. En effet, une comparaison directe sera possible en juin 2007 grâce à l'acquisition du logiciel EM STUDIO.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2005/2006	Damien Bihel Ulrich Nicole (Licence GPI)			
Stage 2005/2006	Yannick Collet (ENSIL)	  		
Projet 2006/2007	Aurélien Beneteau Florian Chantereau Guillaume Dubois (Licence GPI)	  	 	
Stage 2006/2007	Guillaume Dubois (Licence GPI)	  	  	 

#### 10.1.4 Simulation des phénomènes électriques et définition par la simulation des solutions d'immunisation

Cette tâche doit permettre la simulation des phénomènes de propagation des courants dans le sol et la simulation des solutions de réduction de leur impact dans les exploitations agricoles.

Les points techniques abordés, sont :

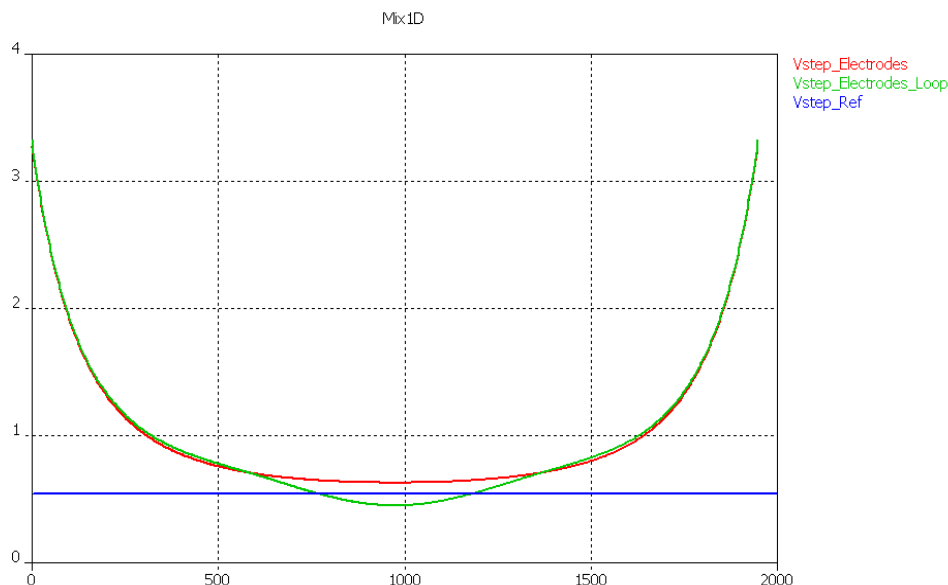
- un état de l'art des logiciels de simulation en basse fréquence,
- la réalisation de l'état de l'art des logiciels de simulation des prises de terre (CAPELINE, KWIKGRID, ...),
- la simulation des expériences réalisées sur le banc d'essai (Section 10.1.4),
- l'étude de cas réels d'exploitation soumis à des courants vagabonds.

Les premiers travaux de 2005-2006, Amadou Diallo ont permis de déterminer le cahier des charges du logiciel recherché. A l'issue des travaux de validation, le logiciel EM STUDIO (CST) a été sélectionné et loué.

Les premières simulations ont été effectuées sur cet outil en Mai 2007. Ce logiciel permet la simulation du banc d'essai (section 10.1.3) ainsi que des cas réels. A titre d'exemple, le constructeur CST a réalisé l'étude d'un cas simple avec et sans boucle en fond de fouille (30 cm de profondeur).

Afin de comparer les simulations aux résultats des expérimentations dans le banc d'essai, les évolutions des tensions de pas en surface du banc d'essai peuvent être tracées (Illustration 30). L'illustration 17 représente l'évolution des tensions de pas de 15 cm :
















- en bleu (Vstep\_Ref), les tensions de pas dans le cas d'une injection par deux plaques parallèles de la taille des faces du banc d'essai
- en rouge (Vstep\_Electrodes), les tensions de pas dans le cas d'une injection par deux électrodes
- en vert (Vstep\_Electrodes\_Loop), les tensions de pas dans le cas d'une injection par deux électrodes en présence d'une boucle en fond de fouille. Pour information, les évolutions simulées sont conformes à celles obtenues par expérimentation.



**Illustration 30: Évolutions des tensions de pas**

Les simulations sous EM STUDIO ont débuté en Juin 2007 lors de l'arrivée de Salah Toubeh dans notre équipe.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2005/2006	Amadou Diallo Oussama Akdar (ENSIL)				
Stage 2006/2007	Amadou Diallo (ENSIL)	  			
Projet 2006/2007	Sylvain Biaussat Arnaud Dartiailh (ENSIL)	  	 		
Stage 2007	Salah Toubeh (ENSIL)	  	 		



### 10.1.5 Etude des interactions entre les éléments présents dans les exploitations agricoles et les structures métalliques utilisées pour l'équipotentialité

Le but de l'étude est de comprendre l'impact réel de ces phénomènes dans les exploitations agricoles et plus particulièrement sur les moyens de corrections proposés. En effet, les systèmes correctifs mis en place pour éliminer les tensions parasites consistent à mettre le site en équipotentialité par l'apport de liaisons ou de surfaces métalliques dans le bâtiment agricole. Ces structures sont dans un environnement agressif. En conséquence, des phénomènes électrochimiques pourraient naître tel que l'effet de pile ou la corrosion.

Les points techniques abordés sont :

- la compréhension du phénomène électrochimique appelé "effet de pile",
- la création d'une instrumentation dédiée à la mesure des tensions continues en exploitation agricole (mise en place de protocole opératoire, fiches de mesures),
- le retour d'expérience de l'instrumentation (limites du matériel)..

Les travaux de Julien Bouyoux se sont d'abord axés sur la création d'une instrumentation capable de mesurer les différences de potentiels continus provoquées par les phénomènes électrochimiques. Une des méthodes est d'utiliser des électrodes de référence Cu/CuSO<sub>4</sub> (Illustration 31). La finalité de ces premières réalisations est l'obtention de mesures de tensions ou potentiels continus reproductibles.

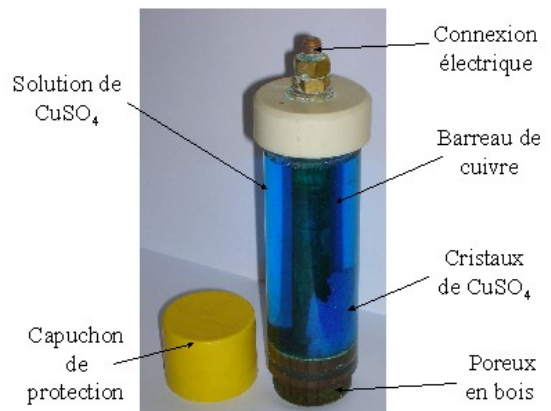


Illustration 31: Electrode de référence

Cette étude a abouti à la création de méthodes permettant :

- d'étalonner l'électrode de référence : en effet, un protocole d'étalonnage quantifie la dérive de l'électrode de référence, et atteste sa conformité pour une nouvelle campagne d'utilisation.
- de quantifier sa dérive en laboratoire et sur le terrain,
- de remettre en conformité l'électrode : si l'électrode de référence n'est plus conforme, une fiche de procédure de mise en conformité est fournie.

Ces travaux ont cherché à démontrer que l'électrode de référence est bien adaptée pour la mesure de différence de potentiels continus entre deux matériaux. Les règles d'utilisation de l'électrode de référence ont été démontrées au cours des études engagées. En effet, si le terrain n'est pas de nature métallique, c'est à dire organique (terre) ou minérale (sable, béton), l'électrode de référence sera à privilégier par rapport aux pointes de touches. Pour conclure cela, trois moyens de mesure sont évalués sur le béton (illustration 32 et 33).

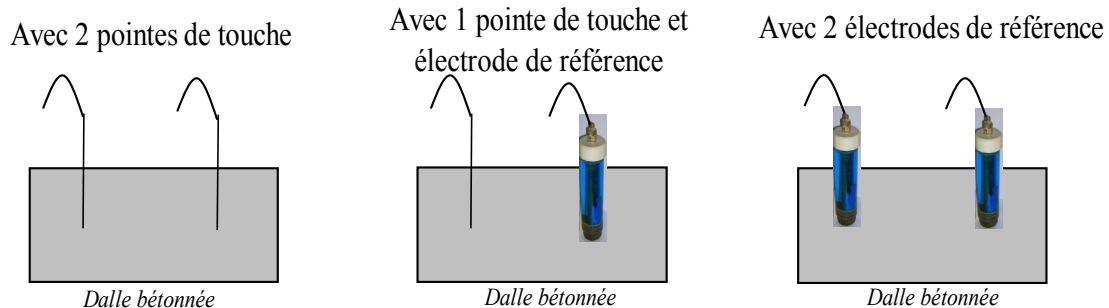
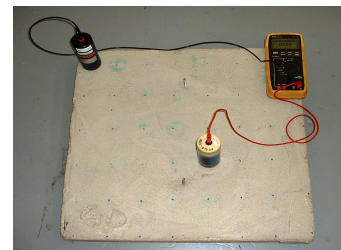


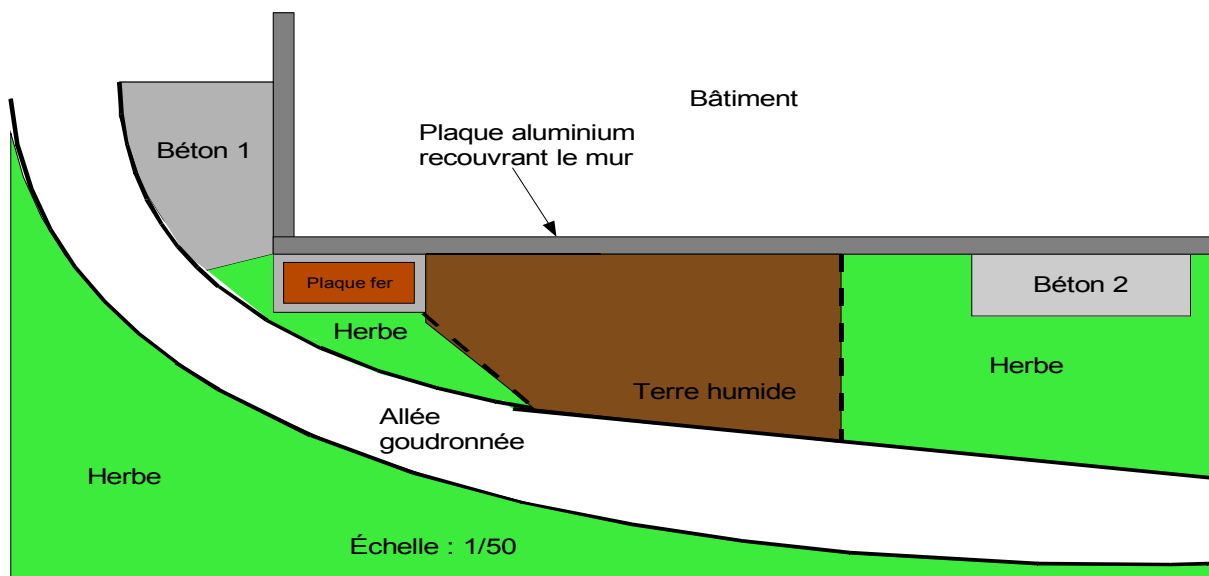
Illustration 32: 3 méthodes évaluées

La meilleure instrumentation est l'utilisation de deux électrodes de référence. En effet, la valeur est stable dans le temps et la mesure est répétitive à plusieurs instants. Dans les deux autres cas, une dérive est présente au cours du temps. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que le béton est un conducteur ionique, or les électrodes de référence peuvent mesurer une différence de potentiel sur ce type de surface grâce notamment à la présence du poreux qui favorise le contact ionique.



**Illustration 33: Dispositif de mesure**

Après avoir fait des premiers essais en « condition de laboratoire », des mesures ont été effectuées en extérieur. Le site choisi pour effectuer les mesures se situe à l'Institut Universitaire et Technologique (I.U.T.) du Limousin. Ce site offre une grande diversité de surface. En effet, il comprend une zone en terre, une zone avec de l'herbe, une plaque métallique et une dalle de béton. L'illustration 34 représente cette zone d'étude. Ce site a permis de valider la méthode de mesure préconisée ainsi que de répondre à de nombreuses questions concernant son utilisation comme par exemple l'influence de l'herbe sur la mesure.



**Illustration 34: Représentation de la zone d'étude**

Egalement, un mode opératoire de l'électrode de référence a été créé expliquant, au travers de fiches associées, dans quelles conditions cet objet doit être utilisé, et quelles en sont ses limites. Ces fiches vont intégrer la phase de détection de la méthodologie de diagnostic.

Les actions à venir sont de valider ce nouvel outil pour la mesure des tensions de pas continu en exploitation agricole. En effet, quelques études sur terrain ont été faites, mais elles sont trop peu nombreuses pour en tirer des conclusions fiables sur la reproductibilité des mesures et plus particulièrement pour savoir si les électrodes mesurent réellement la différence de potentiels présente entre 2 points. En effet, la question qui peut être posée est : est-ce que cette valeur représente réellement le potentiel présente entre les deux points de mesure?

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Stage 2005/2006	Thibaut Lefort (DUT MP)	☹️		
Projet 2006/2007	Julien Bouyoux (LP MQM)	☹️ 😊		
Stage 2006/2007	Julien Bouyoux (LP MQM)	☹️ 😐 😊	☹️ 😐 😊	

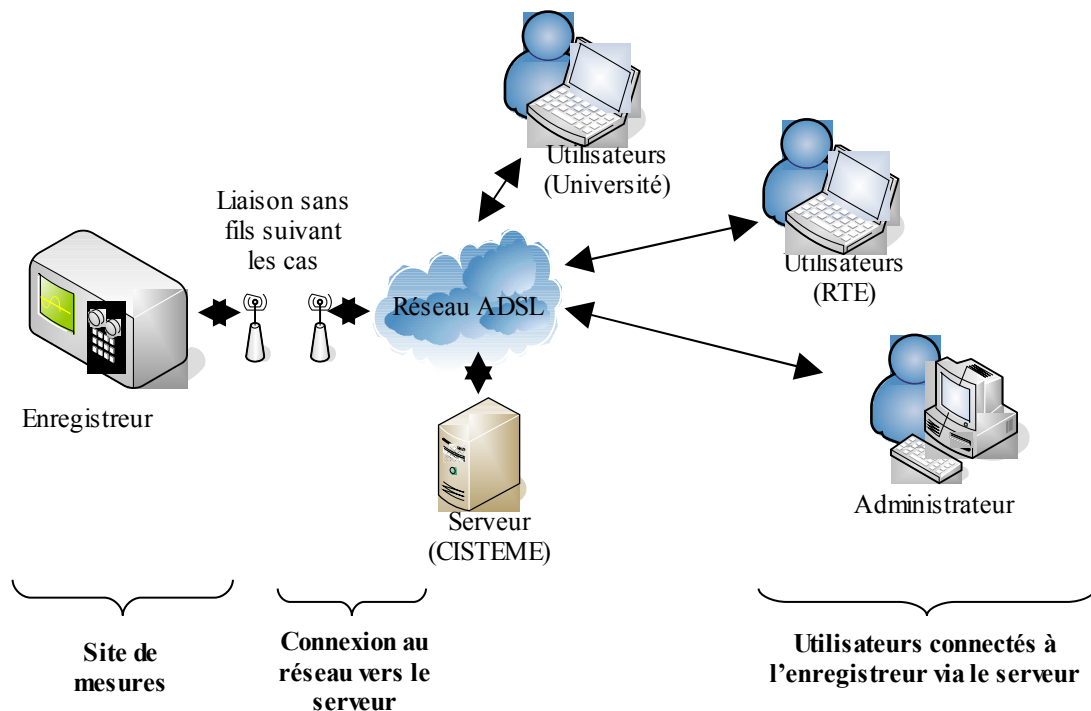
## 10.2 Amélioration des moyens de mesures et de diagnostic

### 10.2.1 Pilotage à distance d'un appareil de mesure via le réseau ADSL

Le suivi et le diagnostic électrique dans les exploitations agricoles est réalisé à partir d'enregistreur numérique. Le pilotage à distance via internet de ces appareils de mesures permet d'améliorer la réactivité du diagnostic. Ainsi, les objectifs de cette étude sont de :

- définir les besoins quand aux fonctionnalités attendues par un système de commande et de saisies de données à distance,
- développer l'interface Web de gestion des appareils de mesures,
- développer l'application de pilotage de l'enregistreur numérique,
- mettre en oeuvre l'infrastructure réseau pour la commande via internet.

L'illustration 35 expose le principe du pilotage à distance.



**Illustration 35: Principe du pilotage à distance**

Les actions menées en 2005-2006 par Olivier Rouchut ont d'abord consisté à analyser l'existant concernant les systèmes d'acquisition, de récupération manuelle des données et de commande des enregistrements. Le premier constat était qu'un tel système doit avant tout faciliter le travail de l'opérateur chargé de recueillir des informations dans le cadre d'expertise. En conséquence, le programme en Labview développé permet d'effectuer un maximum d'opérations depuis son bureau, comme par exemple, le démarrage et l'arrêt des acquisitions, la récupération des données acquises. Egalement, pour réaliser la liaison entre l'enregistreur et l'opérateur, un minimum de matériel réseau est nécessaire et a été sélectionné. A la suite du développement logiciel et du choix des moyens techniques, un déploiement sur une exploitation en Normandie a été réalisé.

Ainsi, toutes les mesures et toutes les récupérations de données ont pu être décidées via le réseau ADSL depuis Limoges sans intervention en local. Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2005-2006	Olivier Rouchut, Cyril Coudert (Licence GPI)	☹		
Stage 2007	Olivier Rouchut (Licence GPI)	☹☹☺		
Projet 2006-2007	Florian Juge, Mikaël Ducloy (Licence GPI)	☹☹☺	☹☺☺	☺

## 10.2.2 Développement d'un réseau de capteurs sans fil

En 2005, un projet mené par Yazide Moustakima, étudiant en Mesures Physiques consistait à réaliser une chaîne de mesure permettant l'acquisition de signaux électriques en milieu perturbé. Les mesures étaient réalisées et transmises directement à un appareil de mesure par liaison filaire. Or, son étude a montré que les signaux acquis étaient perturbés par l'environnement lorsqu'ils étaient transmis (liaison filaire) de manière analogique, aux différents appareils de mesure. L'avantage majeur d'un réseau de capteurs sans fil est d'éviter de transporter la donnée mesurée analogique par des câbles soumis aux couplages électromagnétiques. L'acquisition sera réalisée au plus près de la grandeur à mesurer. (Illustration 36)

Le principe est le suivant, un ou des capteurs mesurent une grandeur dans une exploitation agricole soumise à des éléments perturbants (champs magnétiques et autres problèmes de CEM) et transmettent leurs informations à un superviseur.

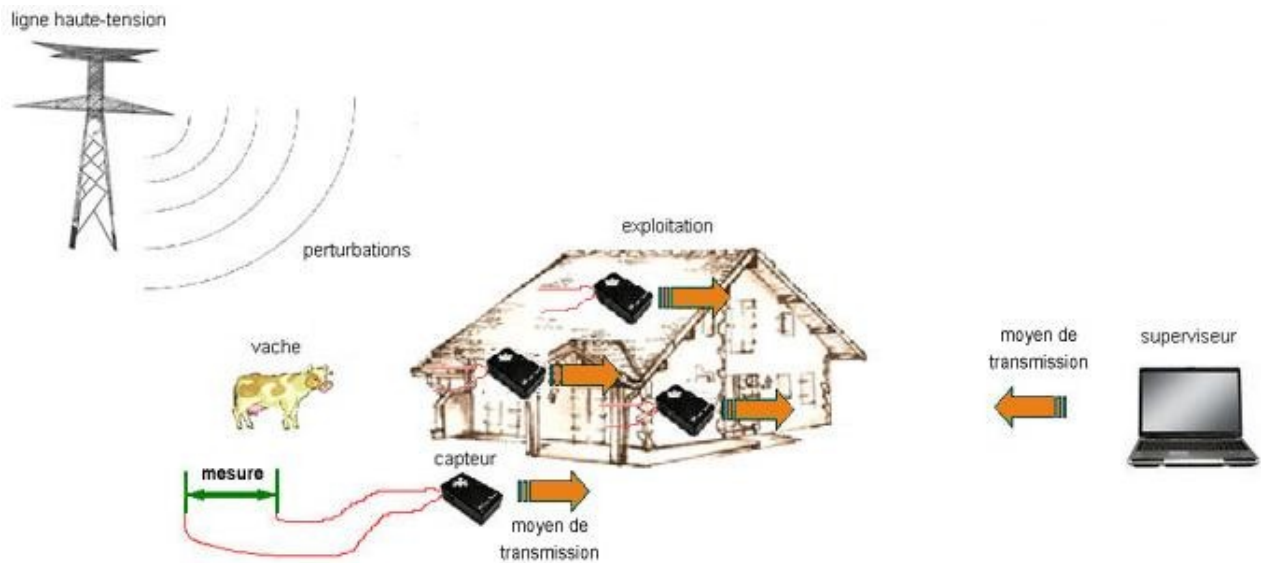


Illustration 36: Environnement de travail du réseau de capteurs

Dans un premier temps, des mini-PC munis de carte de conversion analogique-numérique ont été sélectionnés pour réaliser le projet. L'illustration 37 présente le synoptique du réseau de capteurs.



Illustration 37: Synoptique du réseau de capteurs

Le Superviseur est doté d'un routeur Wifi (802.11g) et chaque mini-PC possède sa propre clé pour pouvoir établir le réseau. Les mesures effectuées par le DAQ sont stockées sur le disque dur du mini-PC. L'utilisateur pourra, s'il le souhaite, rapatrier les données vers son ordinateur. Pour que le système soit cohérent, chaque module (mini-PC) possède une adresse propre et le Superviseur peut dialoguer ou piloter de manière individuelle un module. L'illustration ne montre que trois modules mais le système est capable de fonctionner avec plus.












La partie logicielle a été développée en Labview. Deux programmes distincts sont implantés dans le système final. Un premier au niveau des modules, qui gère l'acquisition des signaux électriques sous ordre du superviseur. Le deuxième programme correspond à l'interface de configuration et de pilotage du réseau qui est installé sur le superviseur. En effet, le logiciel superviseur permet de commander/piloter les modules à distance via une connexion Wifi. Avec ce logiciel, l'utilisateur peut envoyer directement des ordres d'acquisitions. Ce logiciel est aussi capable de démarrer une mesure à une date donnée et de répéter cela à un intervalle donné. Les fonctionnalités développées répondent à un besoin exprimé par les investigateurs déployant la méthodologie électrique en milieu agricole.

Un troisième programme a été développé pour le post-traitement des données (extraction des valeurs maximales, ...).

La finalisation du système (packaging) est en cours. Elle permettra au système de supporter l'environnement sévère des exploitations agricoles (humidité, poussières, ...). Une expérimentation long terme en exploitation agricole sera mise en oeuvre pour valider définitivement ce système.

Au final, ce système intégrera les moyens techniques de la méthodologie au niveau des phases d'identification et de suivi long terme.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2006 à 2007.

Stage 2006	Yazide Moustakima (DUT MP)			
Projet 2006/2007	Julien Bianchin, Raphaël Barbarin, Bertrand Bonnet (Licence GPI)	  		
Stage 2006/2007	Julien Bianchin, Martin Brunet (Licence GPI)	  	  	

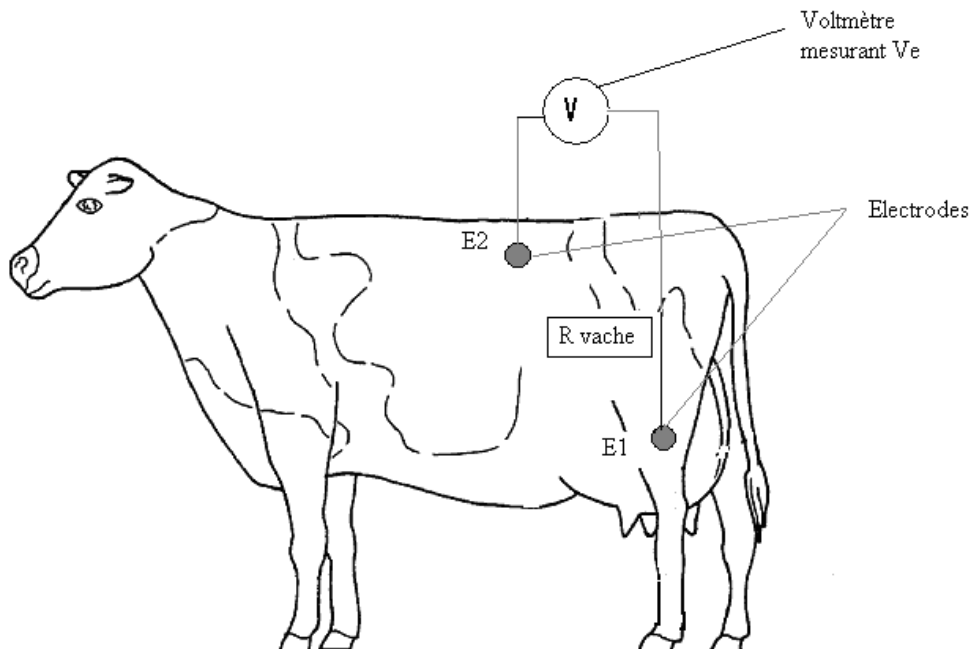
### 10.2.3 Conception d'un système embarqué sur les bovins

L'ensemble des méthodes développées jusqu'à présent pour la mesure des tensions parasites en exploitation agricole n'indique pas la valeur de l'intensité du courant traversant l'animal. Cette étude a pour objectif de développer un dispositif de mesure embarqué directement sur l'animal permettant cette mesure.

Les points techniques abordés sont :

- l'établissement de l'instrumentation et du système d'acquisition autonome et embarqué,
- la création d'un banc ou d'un parcours d'étalonnage du système d'acquisition,
- la validation dans une ferme,
- la rédaction d'un protocole de mise en oeuvre du dispositif de diagnostic embarqué sur le bovin.

Le dispositif de mesure, décrit sur l'illustration 38, permet de mesurer une élévation de potentiel due au courant parcourant la vache à l'aide de deux électrodes (E1, E2). Avec ces mesures, il sera possible de déterminer les valeurs des courants parasites à partir de la loi d'Ohm  $V_e/R_{\text{vache}} = \text{courant } I$  qui traverse. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer la valeur de la résistance du corps de la vache entre les deux points de mesure E1 et E2.



**Illustration 38: Dispositif de mesure**

Des électrodes cutanées ont été sélectionnées par Pierre Brillou. Puis, une carte de conditionnement des signaux issus des deux électrodes a été conçue. Également, un système de télé-mesure a été choisi. Il s'agit de modules sans fil de la société DPS (Illustration 39).

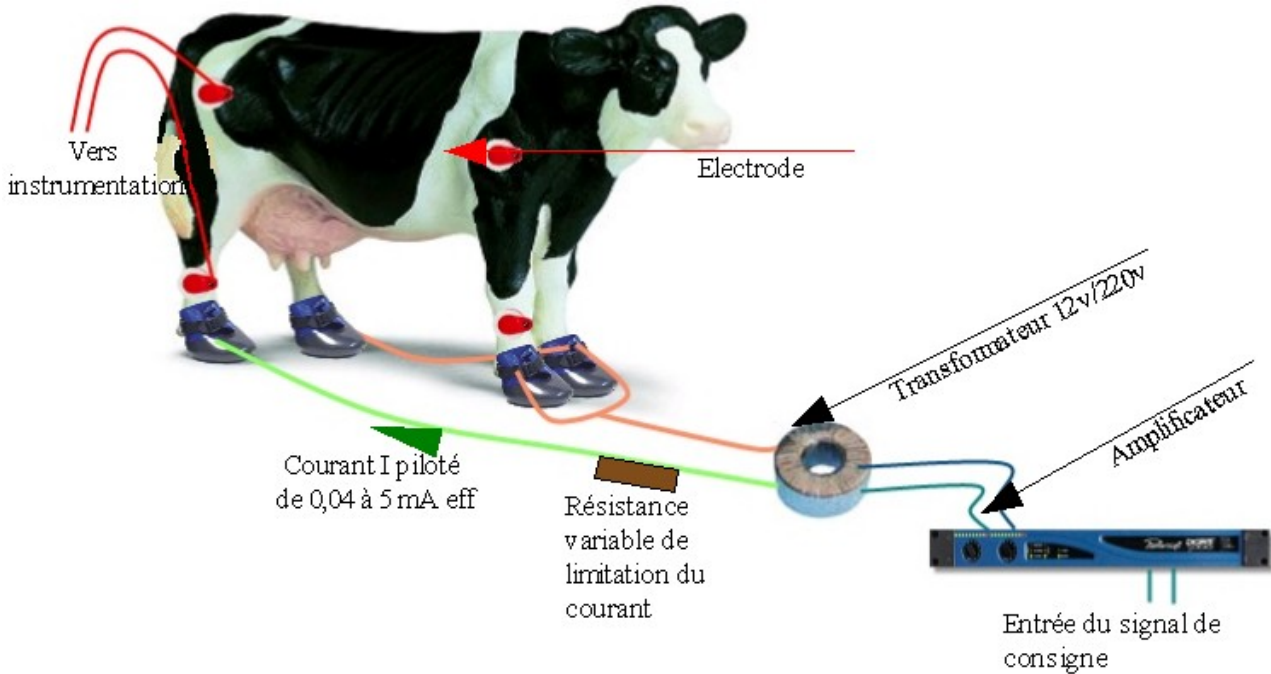


**Illustration 39: Système de télé-mesure embarqué sur l'animal**

A l'issue du développement technique, des expérimentations sur le vivant ont été réalisées en partenariat avec Institut National Agronomique de Paris-Grignon (INA PG). Les premiers essais menés le 15 mai 2007 à la ferme expérimentale de l'INA ont eu pour but de :

- connaître la résistance corporelle de la vache,
- réaliser une cartographie des tensions résultantes des courants qui parcourent la vache,
- situer le meilleur emplacement pour les électrodes.

Le principe de l'injection et de la mesure est montré sur l'illustration 40.



**Illustration 40: Principe de l'injection**

Une vache nous a été mise à disposition par la ferme pour mener à bien ces essais et également une personne compétente pour la mise en place des bottes d'injection et des électrodes à la vache. Les bottes permettent de limiter la résistance de contact au niveau des points d'entrée et de sortie du courant. Le dispositif d'injection étant porté sur l'animal, les mouvements de l'animal ne peuvent pas provoquer une ouverture du circuit d'injection. Les illustrations 41 et 42 montrent la vache équipée du système d'injection.



**Illustration 41: vache équipée des électrodes de mesure**



**Illustration 42: 4 sabots équipés des bottes d'injection**

Au cours des essais, le comportement de l'animal a été surveillé. Aucun comportement brutal n'a été remarqué. L'animal n'a pas semblé être nerveux au vu de son ruminement permanent au cours de l'application du courant atteignant parfois les 2,5 mA efficaces (essai ponctuel pour détecter une modification comportementale). L'animal utilisé pour l'essai est réputé à la ferme pour son caractère docile.

Sur les différents essais, l'animal a été exposé à un courant de 230µA à 1mA. Dans l'hypothèse d'un contact parfait avec les parties sous tension (c'est-à-dire résistances de contact négligeables devant la résistance de l'animal, hypothèse fautive dans la réalité) et permanent (l'animal ne peut pas éviter le défaut ou l'exposition, hypothèse également fautive dans la réalité), la tension de défaut ou d'exposition qui doit exister entre les parties touchées par l'animal, doit être comprise entre 150 et 500 mV efficace.

Commentaires :

- En exploitation, l'ordre de grandeur des tensions de pas mesurées est généralement inférieur à 150mV efficace. De plus, le contact avec les parties sous tension n'est ni parfait ni permanent, la valeur de courant n'atteindra jamais les valeurs injectées lors de l'expérimentation.
- La littérature indique (Cf section 6) que l'effet sur le comportement animal pour un courant compris entre 1 et 3 mA est à peine perceptible. Cela justifie que lors de nos essais (I=230µA...2,5mA), aucun signe anormal n'a pu être observé.





Le dispositif d'injection a parfaitement fonctionné. En effet, il a permis une injection d'un courant alternatif constant quelque soit l'activité motrice de l'animal. Ce dispositif d'injection permettrait si besoin est de caractériser la résistance corporelle de chaque animal d'un troupeau afin d'évaluer la dose de courant reçu à exposition constante (tension constante). Les résistances corporelles déterminées (482-550 ohms) sont cohérentes à celles publiées dans la littérature (Norell, 1983 résistances sabots antérieur-postérieur = 496-1152 ohms).

Les actions à venir sont la réalisation d'une nouvelle expérimentation pour la détermination :

- des différentes résistances de contacts lors d'une exposition par des tensions de pas métal/métal ou béton/béton.
- de la résistance corporelle de l'animal lors d'une exposition par des tensions de contact. L'injection sera réalisée par les systèmes des bottes au niveau des sabots et par un abreuvoir rempli d'eau au niveau du museau.
- des différentes résistances de contact lors d'une exposition par des tensions de contact du type métal/abreuvoir.

Une expérimentation long terme du système embarqué sur l'animal sera aussi menée.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2006 à 2007.

Projet 2006/2007	Amaury Blanchard, Laurent Massaloux, Pierre Brillou (LP GPI)			
Stage 2007	Pierre Brillou (LP GPI)			



## 10.2.4 Etat de l'art des méthodes de tomographie électriques et électromagnétiques

Le sol a une importance capitale puisqu'il peut être la cause ou le vecteur de pathologies à deux niveaux :

Tout d'abord au niveau électrique, puisque les courants circulants dans le sol peuvent engendrer une nuisance pour l'animal. Ils empruntent des chemins privilégiés dans le sous sol (zones les moins résistives).

Par ailleurs, au niveau environnemental, puisque l'eau et les objets contenus dans le sol peuvent entraîner des troubles chez les animaux.

L'objectif de cette étude est dans un premier temps d'identifier différentes méthodes non destructives permettant d'obtenir des cartographies des sols faisant ressortir les zones potentiellement dangereuses (chemins privilégiés des courants fonction de la résistivité des sols, présence d'eau, d'objets enterrés). Dans un second temps, ces méthodes seront testées puis comparées afin d'identifier à terme laquelle est la mieux adaptée pour répondre à notre problématique. La méthode sélectionnée pourrait ensuite intégrer la méthodologie de diagnostic électrique.

Quatre instrumentations de tomographie du sous sol ont été testées par Julie Crouseau :

- La traînée électrique (Syscal), méthode électrique basée sur la théorie de Wenner (Illustration 43).
- L'EM-31 (AIWA) méthode magnétique basée sur l'induction électromagnétique (Illustration 44).
- Le GPR (RAMAC), méthode électromagnétique basée le principe du radar (Illustration 45).
- Le champs mètre CA 42 (CHAUVIN-ARNOUX), méthode magnétique, basée sur les variations de composantes continues du champ magnétique terrestre (Illustration 46).



Illustration 43: Trainée électrique

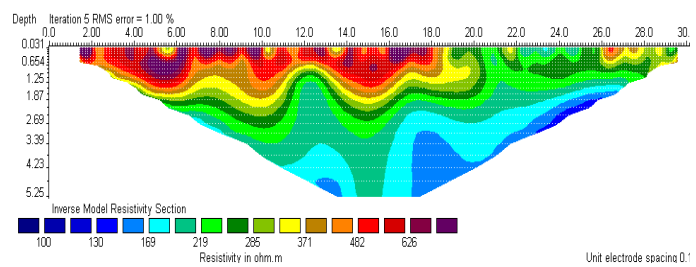


Illustration 44: Méthode magnétique

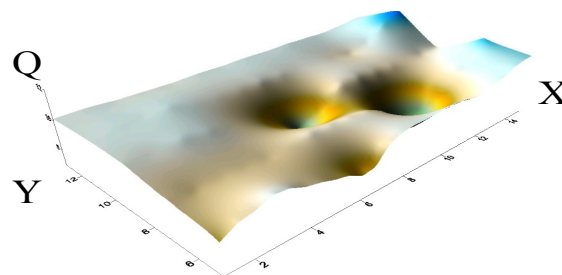
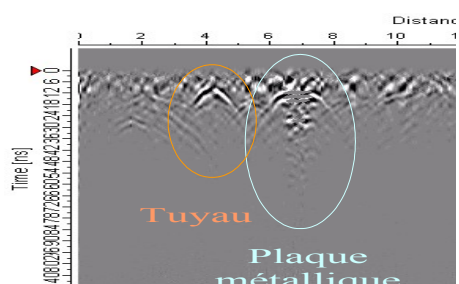
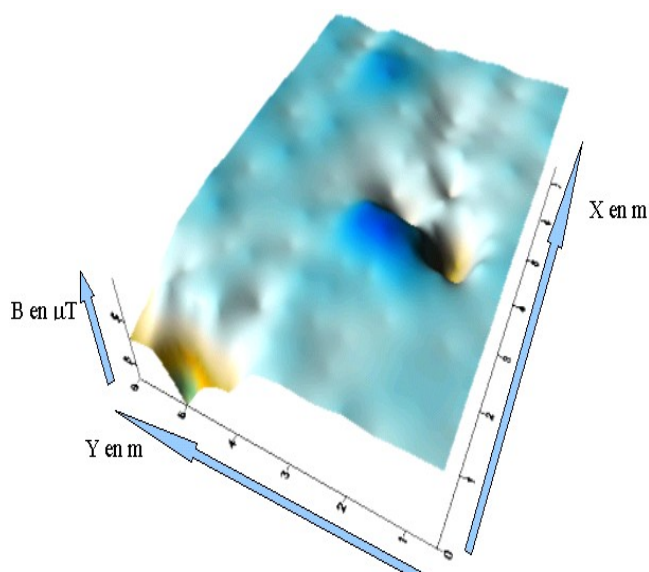


Illustration 45: Méthode électromagnétique





**Illustration 46: Méthode magnéto-tellurique**

Le tableau 10 suivant résume les avantages et inconvénients de chaque méthode.

<b>Méthodes</b>	<b>Vitesse de mesurage</b> (temps indicatif pour la réalisation d'une ligne de mesures de 32 m)	<b>Interférences</b>	<b>Traitement des mesures</b>	<b>Interprétation des résultats</b>	<b>Réponse à la problématique ?</b>
<b>Electrique</b>	Basse (30 min)	Sol humide ou trop sec (sable)	Complexe	Délicate, supposant formation et expérience	Peut-être si l'on a une formation poussée
<b>Magnétique</b>	Elevée (1 min)	Objets métalliques en surface, lignes sous tension	Simple	Assez simple pour le mode vertical, délicate pour le mode horizontal	Oui pour la détection de métaux enfouis et l'eau en surface Peut-être si l'on a une formation pour les zones moins résistives ?
<b>Electro-magnétique</b>	Moyenne (5 min)	Proximité d'objets en surface	Complexe	Délicate, supposant formation et expérience	Oui pour la détection d'objets enfouis, mais peu ou pas pour la détection de zones moins résistives
<b>Magnéto-tellurique</b>	Moyennement élevée (3min)	Bruit de fond	Simple	Matériel non adapté, variations infimes	Matériel non adapté

**Tableau 10 : Comparaison des méthodes expérimentées**

Toute la difficulté réside dans le post traitement des données qui conditionne finalement l'interprétation. Les variables sont multiples et pas toutes maîtrisées. Chaque instrumentation nécessite une

connaissance approfondie de la théorie qui l'accompagne. La connaissance de la géophysique et de l'instrumentation associée nécessite donc des personnes formées.

Au final, compte tenu du manque de savoir et de pratique sur ces instrumentations, le recours à une société prestataire, comme Geocarta semble être actuellement le meilleur choix. Toutefois, pour mesurer des profils de résistivité assez élaborés, l'utilisation de la traînée électrique paraît une bonne alternative, à condition d'y consacrer plus de temps.

D'autres voies d'amélioration peuvent être également citées comme d'utiliser les appareils développés à Cisteme, tel que le capteur permettant de mesurer les variations du champ magnétique statique développé par Fanny Murot ou bien concevoir son propre système de détection magnétique au moyen des transducteurs conçu par Nicolas Barbot (Cf section 10.2.5). Il serait également possible d'envisager d'adapter le système de détection de mines au moyen d'un radar ULB (PULSAR) développé dans le département XLIM de OSA pour cette application.



**Illustration 47: PLUSAR**

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Stage 2005-2006	Julien Fougeyrollas (LPMQM)	☹️		
Projet 2006-2007	Julie Crouseaud (LPMQM)	☹️ 😐 😊		
Stage 2006-2007	Julie Crouseaud (LP MQM)	☹️ 😐 😊	☹️ 😐	

## 10.2.5 Conception de capteur de champs magnétique en statique et en dynamique

L'objectif est de concevoir un ou plusieurs capteurs de champs.

### Cahier des charges en statique :

Le capteur doit fonctionner en statique afin de pouvoir mesurer le champ magnétique terrestre et ses variations au cours d'un déplacement pour obtenir des cartographies. L'idée générale est de caractériser un sol par une mesure magnéto-tellurique. Ainsi, il serait possible de déterminer les chemins les plus probables des courants induits dans les sols.

Le champ magnétique terrestre en France étant d'environ  $45 \mu\text{T}$ , le capteur doit être capable d'évaluer le champ magnétique entre  $35$  et  $55 \mu\text{T}$ . La sensibilité du capteur doit être proche de  $10 \text{ nT}$ .

Le capteur doit être portable (sa masse ne doit pas dépasser  $2 \text{ kg}$ ) et son autonomie doit être autour de  $6 \text{ h}$ .

Trois capteurs ont été essayés :

- un capteur à effet Hall (UGN) de sensibilité  $16 \text{ mV/mT}$  ne permettant pas de mesurer des niveaux si faibles,
- un capteur à effet Hall (UGN) associé avec un concentrateur de flux (illustration 48) de sensibilité  $469 \text{ mV/mT}$ ,
- un capteur magnétorésistif KMZ de sensibilité de  $89 \text{ mV/mT}$  mais après amplification, ce capteur est équivalent en terme de rapport signal sur bruit à l'UGN+concentrateur de  $897 \text{ mV/mT}$ .

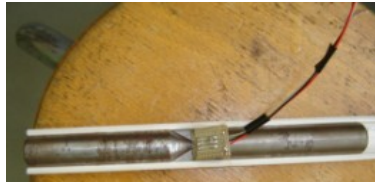


Illustration 48: Concentrateur de flux

Le capteur KMS s'est avéré le seul capable de mesurer des variations faibles de champs magnétiques spatiales en statique.

Bien qu'une carte électronique a été réalisée, on est bien loin d'un véritable prototype. Encore plusieurs points sont à (re)voir:

- L'alimentation du capteur dans sa totalité : piles ( $5\text{V}$ ,  $9\text{V}$ , ...). Le composant KMZ doit être alimenté en  $+5 \text{ V}$ , mais l'amplificateur associé doit être alimenté en  $+15 \text{ V}$  et  $-15 \text{ V}$ . De plus il faut penser que ce capteur doit avoir une certaine autonomie, environ  $6 \text{ h}$ .
- Le capteur, son instrumentation et ses piles doivent tenir dans un boîtier. Ce boîtier doit comprendre un affichage numérique afin de se passer du multimètre et de l'oscilloscope qui sont encombrants.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

TP	IUT MP	☹		
Stage 2006	Jérémy Giraud (LP GPI)	☹ ☹		
Projet 2007	Anthony Lazeiras, Nicolas Bardot, Fanny Murot (MP)	☹ ☹ ☹		
Stage 2007	Fanny Murot (DUT MP)	☹ ☹ ☹	☹ ☹	

## Cahier des charges en dynamique :

Le capteur de champ magnétique dynamique devra mesurer le champ magnétique du à l'environnement (naturel et artificiel). Sa bande passante minimale doit être de 1kHz. La sensibilité de ce capteur doit aussi être de  $1\mu\text{T}$  afin de pouvoir effectuer des mesures dans une plage de  $1\mu\text{T}$  à  $100\mu\text{T}$ . Ce capteur sera installé dans des exploitations agricoles. Par conséquent son coût devra être inférieur à 100 euros (en raison des forts risques de détérioration). De plus pour des raisons de commodité l'autonomie de ce capteur doit être supérieure à deux semaines.

Trois capteurs ont été éprouvés :

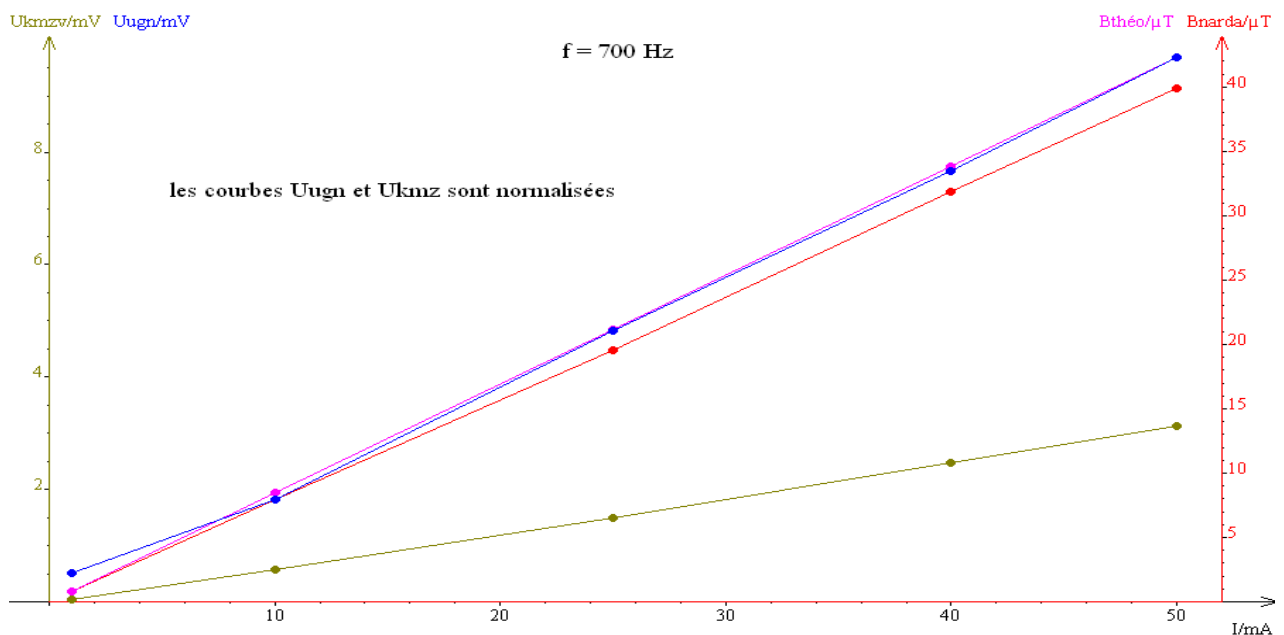
- un capteur à effet Hall (UGN) associé avec un concentrateur de flux,
- un capteur magnéto-résistif KMZ,
- des bobines.

Ces trois capteurs ont été comparés entre eux et également à un champmètre - le EFA 300, fabriqué par la société Narda (Illustration 49) :



**Illustration 49:**  
**Champmètre NARDA**

Les premiers essais ont pour but de comparer la sensibilité des capteurs UGN et KMZ dans le domaine dynamique. La première courbe (illustration 50) donne les variations des tensions mesurées  $U$  en mV à 700 Hz par rapport à l'induction magnétique créée dans un solénoïde (proportionnelle à l'intensité  $I/\text{mA}$  circulant dans le solénoïde).



**Illustration 50: Variations des tensions mesurées par rapport à l'induction magnétique**

Les illustrations 51 et 52 présentent le dispositif d'essai.

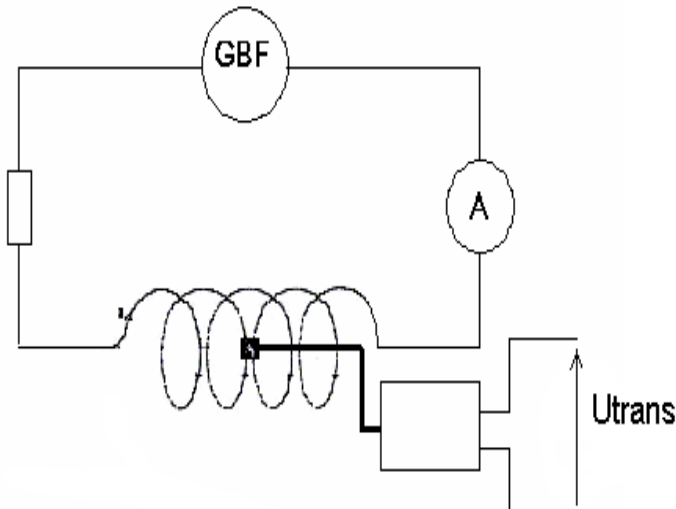


Illustration 51: Principe d'essai

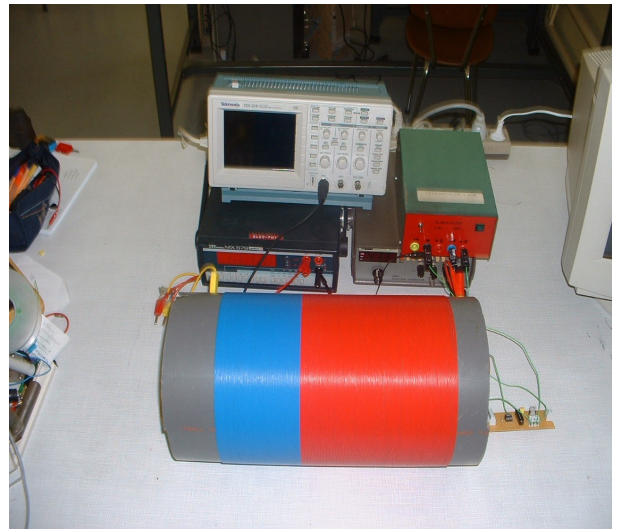


Illustration 52: Dispositif d'essai

Enfin, un traitement a été réalisé ayant pour but de déterminer la valeur du champ magnétique à partir de la tension délivrée par le transducteur Utrans. Si le signal délivré par le transducteur contient plusieurs fréquences (ou plus généralement un domaine de fréquence), il faut décomposer par FFT ce signal en ces différentes fréquences et diviser chacune d'elles par la sensibilité du capteur à ces mêmes fréquences.

Ces différentes étapes ont été réalisées automatiquement par un programme (VI) écrit avec le logiciel LabVIEW.

Le champ magnétique créé par le solénoïde a été mesuré par les différents capteurs.

- KMZ :  $41 \mu\text{T}$ ,
- UGN + Concentrateur :  $37 \mu\text{T}$ ,
- Bobine :  $29 \mu\text{T}$ ,
- EFA 300 :  $32 \mu\text{T}$ .

Pour chacun d'entre eux l'ordre de grandeur est respecté.

Pour les traitements, il serait souhaitable de pouvoir acquérir les données avec une carte d'acquisition pour pouvoir observer les résultats en temps réel. Lorsque le programme sera totalement au point, la dernière étape consistera à optimiser l'algorithme afin de réduire le temps de calcul.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2007	Anthony Lazeiras, Nicolas Barbot, Fanny Murot (MP)	☹️ 😐 😊		
Stage 2007	Nicolas Barbot (DUT MP)	☹️ 😐 😊	😞 😊	

## 10.2.1 Premières application de l'expertise environnementale

En 2006, les travaux de M. Julien Fougeyrollas ont mis en évidence l'intérêt de l'intégration d'un domaine environnemental dans un protocole GPSE. Des démarches ont été notifiées, des instrumentations choisies.

La mise en oeuvre sur le terrain de cette expertise implique :

- de valider l'instrumentation sélectionnée :

Pour ce faire toute l'instrumentation pour la mesure de la qualité de l'eau, du prélèvement (illustration 55) à l'analyse (illustration 53 et 54), a été regroupée dans une valise (illustration 56).



**Illustration 55:** Canne de prélèvement



**Illustration 53:** Photomètre

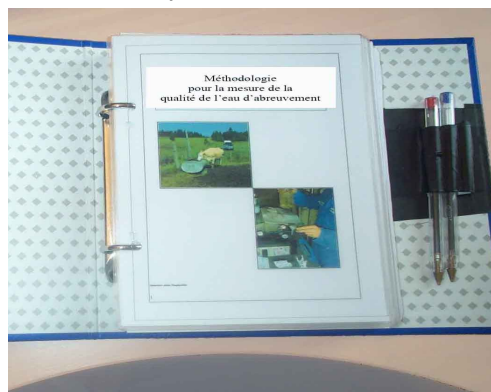


**Illustration 54:** Bandelette test



**Illustration 56:** Valise environnementale

De plus, les mesures n'étant pas forcément réalisées par un spécialiste, un classeur (illustration 57), regroupant les modes opératoires et les fiches d'analyse, a été élaboré.



**Illustration 57:** Classeur de la méthodologie environnementale

- des analyses dans des exploitations ne subissant aucun trouble :

Ces premières mesures (tableau 11) réalisées dans deux exploitations par Aurélie Pauvert ont permis de donner une démarche générale pour déterminer des seuils pouvant engendrer un déclenchement d'action corrective.

Type de matériel utilisé	Paramètres analysés	Recommandation	Exploitant X		Exploitant Y			
			eau de ville	eau de puit	eau puit abreuvoir	eau puit abreuvoir bâtiment	eau puit lavage	eau récupération
photomètre	Odeur	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Turbidité	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide
	Couleur	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cu (mg/l)	0 à 0,6	0,40	0,30	0,30	0,30	0,50	0,30
	Fer (mg/l)	0 à 0,3	0,01	0,03	0,01	0,05	0,04	0,06
	Zinc (mg/l)	0 à 5	0,20	0,20	0,00	0,10	0,50	2,20
	pH	6,8 à 7,5	6,9	7,2 - 7,6	7,2 - 7,6	8,0	8,1	6,4
	N (mg/l)	0 à 200	3,84	>225	2,00	1,99	1,85	2,37
	TH (°F)	10 à 20	15,10	>48	30,00	40,00	40,00	28,00
	P (mg/l)	0 à 1	0,42	0,22	0,12	1,14	0,36	0,90

Tableau 11 : Comparaison des méthodes expérimentées

Prenons l'exemple du PH :

- l'exploitant Y, bien qu'ayant un ph inférieur pour l'eau de récupération et supérieur pour l'eau de puit, n'a jamais constaté le moindre trouble. Il est donc possible de considérer que un ph compris entre 6,4 et 8,1 ne peut être la cause d'un trouble. Le seuil de déclenchement concernant le ph devient donc  $ph < 6,4$  ou  $ph > 8,1$ .

- de définir une méthodologie de diagnostic environnemental

Aurélie Pauvert propose la démarche de l'illustration 58.

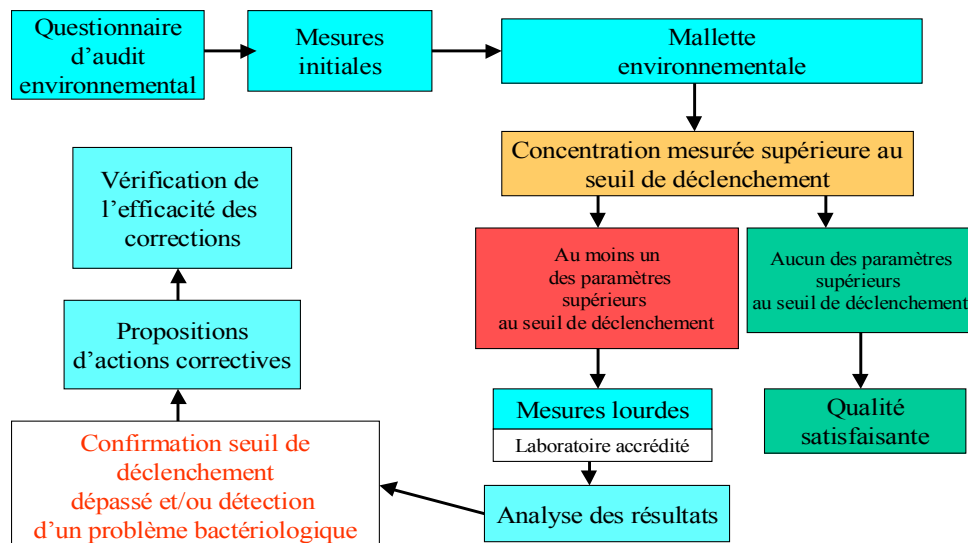


Illustration 58: Méthodologie de diagnostic environnemental



Des questions environnementales ont donc été rajoutées au questionnaire d'audit et à l'inspection visuelle. La mallette environnementale accompagnée de son classeur ainsi que la façon de déterminer les seuils de déclenchement d'action ont été définis. Des corrections possibles à d'éventuel dépassement de ces seuils ont été proposées.

- des analyses dans des exploitations subissant des troubles :

Ces mesures réalisées toujours par Aurélie Pauvert dans deux autres exploitations ont donné les résultats du tableau 12.

Type de matériel utilisé	Paramètres analysés	Recommandation	Exploitant W		Exploitant Z			
			eau de puisage avant correction	eau de puisage abreuvoir	eau puit robinet	eau puit avant traitement	eau puit abreuvoir fin de ligne	eau puit abreuvoir milieu ligne
photomètre	Température	25°C	11	10	16	19	17	18
	Odeur	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Turbidité	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide	Limpide
	Couleur	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Fer (mg/l)	0 à 0,3	>120	0,00	0,04	0,01	0,03	0,03
	Zinc (mg/l)	0 à 5	0,10	0,20	0,20	0,10	0,00	0,20
	pH	6,8 à 7,5	6,4	6,7	6- 6,4	6- 6,4	6,3 - 6,4	6,4 - 6,6
	TAC (°F)	10 à 30	9,70	14,40	3,40	3,70	4,00	4,60
	TH (°F)	10 à 20	11,20	15,60	6,00	10,60	11,20	8,70
	Sulfate (mg/l)	0 à 250	81	58	1,7	0,9	0,9	0,9
	N (mg/l)	0 à 200	11,30	10,90	45,00	49,00	44,00	47,00
	P (mg/l)	0 à 1	0,30	0,60	0,20	0,50	0,30	0,20
	Cu (mg/l)	0 à 0,6	0,50	0,20	0,10	0,10	0,20	0,20






















Tableau 12 : Comparaison des méthodes expérimentées

Prenons de nouveau l'exemple du PH :

- l'exploitant W, bien qu'ayant un ph inférieur aux recommandations, ne dépasse pas les seuils déclenchant une action. Rappelons que ces mesures sont ponctuelles et ne garantissent pas un dépassement ne peut avoir lieu en fonction des conditions météorologiques ou des saisons.
- l'exploitant Z dépasse ces seuils, mais nous ne pouvons pas considérer que cela doit engager une action corrective vu le manque de mesure sur lequel reposent ces seuils.

D'autres analyses dans des exploitations saines devront être réalisées ultérieurement afin de créer une banque de données permettant de définir les seuils de déclenchement des actions correctives. La création de la banque de données pourra être réalisée, en collaboration avec des chambres d'agricultures, sur un nombre important d'exploitations laitières.

Le tableau ci après montre la progression de l'étude de 2005 à 2007.

Projet 2005/2006	Julien Fougeyrollas (LP MQM)	  		
Stage 2006	Julien Fougeyrollas (LP MQM)	  		
Projet 2006/2007	Aurélie Pauvert (LP MQM)	  	  	
Stage 2007	Aurélie Pauvert (LP MQM)	  	  	 

## 11 Conclusions et perspectives

---

La compréhension et les mesures des phénomènes électriques parasites en milieu agricole ne sont pas faciles et nécessitent des connaissances et des moyens qui dépassent largement ceux des conseillers habituels de l'élevage.

C'est la raison pour laquelle la démarche du Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique a été créée. Parallèlement aux activités du GPSE, le Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE) a commandité CISTEME pour des travaux de recherche visant à établir une méthodologie de diagnostic électrique pouvant être déployée de manière quasi-systématique dès l'apparition de troubles dans une exploitation. En support de cette méthodologie, des études et recherches ont été menées afin d'apporter un soutien technique et scientifique aux investigations sur site.

Il est possible d'inventorier la présence de phénomènes électriques parasites d'une part, et l'existence de trouble supposés associés d'autre part mais il reste difficile d'établir un lien de causalité. La revue bibliographie ne donne que peu d'informations et reste fort laconique sur des études supplémentaires pouvant apporter des réponses nettes et validées. Sur le terrain, on est le plus souvent mené à parler de "schéma classique d'apparition de troubles susceptibles d'être la conséquence d'un problème électrique". Il convient de garder à l'esprit qu'il y a peu d'indicateurs fiables pour diagnostiquer une cause électrique.

Cependant, lors de problèmes de productions laitières et/ou de santé pouvant être imputés à l'environnement, l'électricité doit faire partie intégrante de l'investigation. Une exploration tant des installations électriques sur l'exploitation que des sources potentielles hors de l'exploitation doit alors être effectuée.

La méthodologie de diagnostic électrique a été établie de manière à répondre à ces besoins. En effet, avant toute intervention, une approche globale a été définie pour être déployée systématiquement à chaque nouveau cas. Les troubles et leurs conséquences ainsi que l'environnement électrique présent dans l'exploitation sont recueillis au travers du questionnaire d'audit et de l'inspection visuelle.

Après analyses de ces informations, le domaine électrique peut intervenir pour détecter la présence de signaux électriques parasites et/ou l'existence de non-conformité des installations électriques. Si des non conformités sont détectées, des corrections doivent être apportées avant toute nouvelle campagne de mesures. Dans le cas où des signaux électriques anormaux sont toujours mesurés, la recherche de la localisation et de l'identification de la source est engagée. A l'issue de ces deux phases, l'investigateur connaît la source qui provoque l'apparition de tensions ou courants parasites dans l'exploitation.

Cette méthode pragmatique permet d'établir un diagnostic rapide et systématique sur les exploitations présentant des troubles pouvant être imputés au domaine électrique, mais elle possède toujours des limites.

La première est que les phases initiales dites systématiques établissent un diagnostic électrique de l'exploitation à un instant donné. Les anomalies pouvant exister de manière aléatoire ne sont pas détectées.

La deuxième est que le diagnostic découlant de l'application de la méthodologie n'a pas pour objet de dire si les animaux sont perturbés par l'électricité mesurée. La méthode conclut seulement sur l'existence d'anomalie électrique et détecte l'équipement qui en est la source.

La dernière est que l'utilisation de la méthode ne permet pas d'acquérir des connaissances scientifiques supplémentaires lors des expertises électriques. Des actions de mesures expérimentales sur le terrain doivent donc être apportées, au cas par cas, pour fortifier les connaissances des phénomènes électriques.

Cette méthodologie n'est pas définitive, la démarche doit évoluer au fil des affaires et des spécificités rencontrées lors d'expertises. Aussi, de nouveaux outils, moyens techniques et méthodes seront à développer.

Les études, support de la méthodologie ont apporté les premiers outils adaptés au diagnostic électrique. De nouvelles méthodes de diagnostic sont aussi en cours de développement. Tous ces projets et études contribuent aux évolutions nécessaires et indispensables à la méthodologie de diagnostic.

Par ailleurs, il existe certaines évidences quant aux effets de l'électricité sur les êtres vivants. La recherche a permis d'établir avec certitude que des anomalies au niveau d'une installation électrique (défaut d'isolement, court-circuit, ...) peuvent perturber certains animaux. Cependant, des lacunes persistent au niveau de la nature des phénomènes électriques, des méthodes de détection, des vecteurs de propagation (sol, zone aquifère, ...) et des moyens correctifs, (équipotentialité, prises de terre, ...). Les études ont permis d'amorcer une démarche d'amélioration des connaissances sur les phénomènes électriques. Citons comme exemple, les expérimentations sur le banc d'essai qui ont permis de comprendre la propagation des courants, les effets de différentes structures enterrées sur la propagation de ces courants et ainsi de définir des méthodes d'immunisation des exploitations.

Aujourd'hui encore une réelle nécessité d'approfondir ces phénomènes s'impose. De plus, le passage des résultats expérimentaux à la mise en pratique sur le terrain n'est pas sans obstacle. Des phénomènes électriques restent encore mal connus comme par exemple l'effet de pile. Une méthode de mesure est disponible et devra être éprouvée sur le terrain. Les prochaines expertises en exploitations agricoles devront l'utiliser afin de constituer un retour d'expérience. Malgré l'ensemble des résultats encourageants et formateurs des études exposées, il est encore nécessaire de poursuivre ces actions de recherche et notamment les aspects simulations.

Les perspectives liées à la méthodologie concernent principalement l'application de celle-ci dans le cadre de deux activités.

La première activité concerne l'utilisation de cette démarche pour l'expertise des cas à problèmes.

La deuxième activité est la création d'une banque de données électriques de référence. La constitution de cette banque de données passerait d'abord par le déploiement de la méthodologie dans des exploitations en absence de proximité avec un ouvrage électrique (diagnostic électrique blanc). De cette banque de données, il pourrait en être déduit des seuils de déclenchement des actions correctives. A l'heure actuelle, par exemple, il est impossible de dire à partir de quel niveau de non conformité de l'installation électrique, il faut demander à l'exploitation une mise en conformité. En pratique, pour répondre à cette deuxième activité, une collaboration entre CISTEME, le GPSE, RTE et une ou plusieurs chambres d'agriculture serait nécessaire. Deux zones seront alors étudiées : les exploitations agricoles de la première zone pourraient être le support du diagnostic électrique blanc, tandis que les exploitations de la seconde zone seraient les cas diagnostiqués.

Au delà de la poursuite des travaux scientifiques et méthodologiques, les premiers résultats du projet de recherche RTE/CISTEME sont à valoriser selon 3 axes.

Le premier volet de la valorisation de ce projet de recherche concernera la vulgarisation des résultats pour le monde agricole au travers d'articles ou de reportages dans des magazines (Bulletin vétérinaire, Monde agricole, ...).

Le deuxième concernera une valorisation technique des études via des communications dans des revues scientifiques (SEE, IEEE, ...). Également, la première journée thématique sur les courants vagabonds sera organisée sur Limoges à l'automne prochain regroupant des industriels tel que la SNCF, RTE, ...

Le troisième concernera la formation des agents de RTE amenés à déployer une ou plusieurs étapes de la méthodologie de diagnostic. Dans un souci de transparence, le même type de formation serait également possible pour les agents des chambres d'agriculture amenés à travailler dans le cadre de ces affaires.

Finalement, le travail réalisé au cours de mon DRT en collaboration avec RTE représente une expérience professionnelle très enrichissante, d'un point de vue technique (pluridisciplinarité des études), administratif, compte tenu de l'écriture des clauses contractuelles des conventions de collaboration RTE/CISTEME, mais aussi d'un point de vue humain à travers l'encadrement des équipes travaillant sur les projets.

## Bibliographie

- DESCHAMPS F. *L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles* . Bulletin de la société vétérinaire pratique de France, 2002, N°3, pp.174
- BRUGERE H. *Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage* . Bulletin de la société vétérinaire pratique de France, 2002, N°3, pp.182
- OMS . *Champs électromagnétique et santé publique [ en ligne ]*. Disponible sur : <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/fr/>> (consulté le 10.04.2007)
- Proceedings from Stray Voltage and Dairy Farms*, Conference 2003, NRAES-149, page 8.
- FORTIER M. et BOILY, R., *Les tensions parasites et la production laitière*, Bulletin CPAQ-Bovin laitier, 1993, Conseil des productions animales du Québec
- CHURCHWOOD R.E . *A note on the occurrences of electric shocks and their possible effects on development of mastitis*, Aust. Vet. , 1948
- PHILLIPS D.S.M . *Production of the cows may be affected by small electrical shocks from milking plants*, N.Z.J. Agric. , 1962
- CRAINE L.B . *Electrical ground currents*, Washington State University, 1969
- FIESTMAN F.J. *Tingle voltages in milking parlors*. British Columbia Dept. Agric. Engineer (Canada), 1975
- FAIRBANK W. *Milking parlor métal structure-to-earth voltages*, Western Regional Agricultural Engineering Service, 1978
- GODERHOLM L.H *Stray voltage problems in dairy milking parlors*, ASAE, 1979
- CLOUD H.A. *Diagnostic and mitigation procedures for stray voltage problems*, IEEE Rural Electrical Council Conference, 1982, New York
- NATIONAL RURAL ELECTRIC COOPERATION ASSOCIATION. *Summary of the proceeding of stray voltage workshop*, 1983
- NORELL R.J. *Behavioral studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents*. ASAE, 1983
- GPSE, *Mieux connaître les risques des courants parasites électriques dans les exploitations d'élevage*, Plaquette préparée par la MAP, EDR-RTE, PROMOTELEC, l'APCA, et GROUPAMA, 2000
- BRUGERE H. *Quels sont les impacts des courants électriques sur les animaux ?*, ISPAIA, 2000, p11-22
- RTE-EDF, *Les champs électromagnétiques de très basse fréquence*, 2005
- POLK C. *Cows, ground surface potentials and earth resistivity*, Bioelectromagnetic, 2001, p7-18
- APPLEMAN R.D and GUSTAFON R.J. *Source of stray voltage and effects on cox health and performance*, J. Dairy, 1992
- KIRK J.H, *Stray voltage and the dairy cows*, Agri. Practice. 1989
- HULTGREN J. *Small electric currents affecting farm animal and man*, Vet. Res. Commun. 1990, p299-308
- GOREWIT R.C, *Effects of voltages on cows over a complete lactation*, J. Dairy, 1992
- GRAVE R.E. *Quality living for productive and reproductive cows*, Symposium sur les bovins laitiers, 2003

# Glossaire

Ampère (A) : Unité du système international servant à la mesure de l'intensité du courant électrique.

Approche globale : Méthode qui préconise l'examen de l'ensemble globale des causes qui peuvent affecter la santé animale et la production d'un troupeau, en ayant recours à différents experts.

Cellules somatiques : Cellules du corps d'un organisme chargées des fonctions de relation et de nutrition de l'organisme par opposition aux cellules germinales, ovules et spermatozoïdes.

Courant de neutre : Ensemble des courants circulant dans le neutre. Il est composé principalement du courant de retour de l'installation du client et du courant de défaut.

Courant électrique : Déplacement de charges électriques d'un point électrique à un autre dans un élément conducteur (fil électrique, conduit métallique, liquides, sol, etc.). Le courant électrique peut circuler de façon alternative ou continue et sa valeur (intensité) s'exprime en ampères (A).

Mammite : Infection de la mamelle des animaux producteurs de lait sous l'action d'agents pathogènes microbiens variés.

Mise à la terre : Connexion électrique entre un corps conducteur et la terre de résistance suffisamment faible et d'intensité suffisante pour empêcher tout courant dans le conducteur de mise à la terre d'engendrer une tension dangereuse.

Neutre : Désignation d'un conducteur, d'une borne ou d'un élément raccordé au point neutre d'un réseau électrique.

Poste de distribution : Installation de grande dimension, extérieure ou intérieure, située au confluent de plusieurs lignes électriques et qui contient l'appareillage nécessaire à la transformation de la haute tension en moyenne tension.

Résistance : Aptitude d'un corps à s'opposer au passage du courant. La résistance est plus ou moins grande suivant les caractéristiques du conducteur (taille, longueur, type de matériau). Elle s'exprime en ohms ( $\frac{1}{2}$ ) et est égale à la tension (en volts) sur l'intensité du courant (en ampères).

Tension : Différence de niveau électrique entre deux points, par exemple un conducteur et la mise à la terre. Plus la différence entre ces deux points est grande, plus la tension est élevée. La tension électrique s'exprime en volts (V).

Tension de neutre : Tension qui existe entre le neutre et une tige de mise à la terre de référence.

Tension parasite : toute différence de tension (volt) enregistrée entre deux points susceptibles d'être touchés par un animal et qui peut occasionner une circulation de courant qui affecterait son comportement. Les animaux réagissent au courant produit par une tension et non à la tension elle-même. Pour qu'un animal réagisse au contact des deux points, la source de tension doit engendrer une circulation de courant d'une intensité supérieure au seuil de tolérance de celui-ci.

# Annexe 1

<i>Rédacteur :</i> Sébastien SAHUGUEDE	<i>Référence de fiche :</i> Mode_opératoire_Tension_pas
<i>Organisme :</i> CISTEME Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, Electromagnétisme et Electronique  Ester Technopole – BP 6913 87069 Limoges Cedex	<b>Mode opératoire de la mesure de la tension alternative de pas</b>

**Objet :** Mode opératoire de la mise en oeuvre de la mesure d'une tension alternative de pas

## Préparation

### Méthode

Mesure de tension et observation de la forme d'onde.

Les animaux ont les pieds sur le sol et par conséquent, ils peuvent être soumis aux potentiels dus aux courants surfaciques. En conséquence, l'écartement des points de contact doit être équivalent à l'écart du train avant-arrière de l'animal (1,80 m pour une vache) et les points de mesures doivent être posés sur le sol.

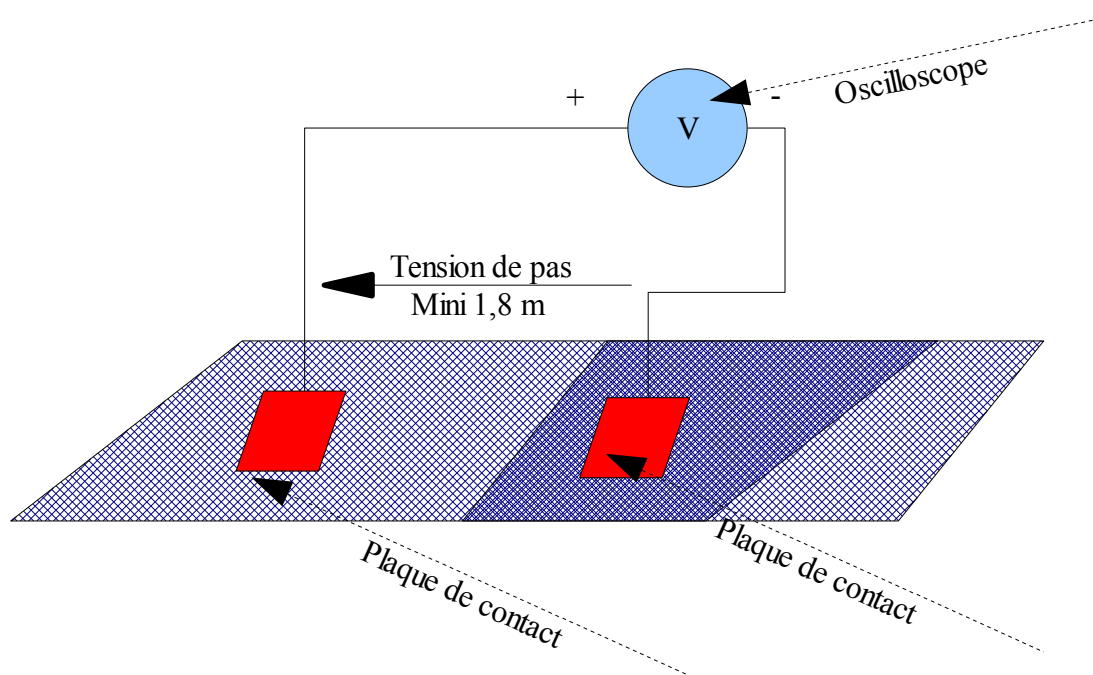
### Matériel utilisé

Oscilloscope Metrix OX 7042 C  
2 câbles bananes de longueur 1,5 mètres  
2 plaques de contact

### Mode opératoire

1. Connecter les deux câbles entre les plaques et l'oscilloscope
2. Humidifier les deux zones de contact pour limiter la résistance de contact sol/plaque
3. Poser les deux plaques de mesures au sol avec un écartement d'environ de 1,80 m
4. Régler les calibres suivants sur l'oscilloscope :
  - Calibre horizontal : 10 mV/DIV en AC
  - Calibre vertical : 1 ms/DIV
  - Limiter la bande passante de l'oscilloscope à 5kHz (Menu>>Vert>>ch1>>Sensibilité/Couplage) dans le cas de mesure de tension de pas 50Hz
  - Trigger Automatique (Déclenchement à 3 mV)
5. Activer la mesure automatique de la tension efficace  $V_{eff}$  (Menu>>Mesure>>Mesures automatiques >>  $V_{eff}$ )
6. Activer la mesure automatique de la tension crête-crête  $V_{pp}$  (Menu>>Mesure>>Mesures automatiques >>  $V_{pp}$ )
7. Relever la forme d'onde, la fréquence du signal, la valeur efficace et la valeur crête-crête de la tension. Dans le cas de l'étude des indicateurs 50Hz, la mesure et le relevé de l'oscillogramme doivent être réalisés avec filtrage 5kHz.
8. Enregistrer éventuellement l'oscillogramme

### Schéma synoptique



## Mise en oeuvre

### Mesures préparatoires pour la vérification du bon fonctionnement de la chaîne de mesure

Mettre les deux plaques en contact, observer l'oscillogramme et la valeur de la tension efficace.

Pour conclure du bon fonctionnement de votre instrumentation, vous devez observer un oscillogramme plat (bruité éventuellement) ne présentant aucune forme d'onde. Aussi, la valeur de la tension efficace doit être proche de 0 (<2mV eff).

### Choix des points de mesures

Les points de mesures devront être positionnés au niveau des changements de nature du sol que peuvent rencontrer les animaux lors de leur circulation. En effet, les différentes expertises ont montré que le changement de la nature de sol fait généralement naître une différence de potentiels (ddp) ou tension de pas significative. Exemple : passage d'un sol bétonné ferrailé vers un sol bétonné non ferrailé, passage d'un sol terre battue vers un sol bétonné ...

Dans le cas de mesure dans une zone de couchage, de stabulation, d'attente, 3 mesures de tensions de pas réparties dans la surface de la zone doivent être réalisées afin de détecter si une partie de cette zone est plus exposée à une anomalie électrique.

Aussi, les tensions de pas devront, si possible, être réalisées dans deux directions. La première mesure selon une direction parallèle aux lignes électriques du réseau de transport, la deuxième mesure selon la direction perpendiculaire à la première (Un signe  $\perp$  différencie cette mesure dans les tableau de mesure des fiches d'outils de diagnostic).

### Mesure de la tension alternative de pas

La tableau ci-dessous indique les paramètres à relever sur la tension de pas.

N°	Ddp entre <span style="float: right;">et entre</span>		Forme d'onde	Fréq. ou période	Niveau Veff/ Vpp	Autres obser.	Ref Oscillo « P_N° »	Significatif
1	Sol bétonné de l'aire attente	Sol bétonné de l'aire traite						

L'analyse, visant à dire si le signal mesuré est un signal significatif, est à mener selon les spécifications suivantes.

## Spécifications

La spécification ne correspond pas à un niveau électrique pouvant induire une gêne chez l'animal mais des critères permettant de décider si le signal mesuré est significatif.

Paramètres	Critères	Observations
Tension alternative de pas significative	20 mV crête-crête Forme d'onde reconnaissable visuellement (sinusoïde, carrée, transitoire périodique, ...)	Dans le cas de l'étude d'indicateurs 50Hz, la mesure et le relevé de l'oscillogramme doivent être réalisés avec filtrage 5kHz.