



THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(AgroParisTech)**

Spécialité : Sciences animales

*présentée et soutenue publiquement
par*

Karim RIGALMA

le 14 décembre 2009

**EFFETS DES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES CHEZ LES RUMINANTS,
en conditions d'élevage**

*Directeur de thèse : **Christine DUVAUX-PONTER***

*Codirecteur de thèse : **Sabine ROUSSEL***

*Travail réalisé à l'UFR Nutrition animale, qualité des produits et bien-être
Département Sciences de la Vie et Santé, AgroParisTech, F-75005 Paris, France*

Devant le jury :

M. Henri BRUGÈRE , Professeur, ENVA	Président
M. Guy-Pierre MARTINEAU , Professeur, ENVT	Rapporteur
Mme Marie-Christine MEUNIER-SALAÜN , Ingénieur de Recherches, INRA	Rapporteur
Mme Christine DUVAUX-PONTER , Professeur, AgroParisTech	Examineur
Mme Jocelyne FLAMENT , Maître de Conférences, AGROCAMPUS OUEST	Examineur
Mme Sabine ROUSSEL , Maître de Conférences, AgroParisTech	Examineur

Invités

M. François DESCHAMPS, Chargé de mission expert, **RTE**

Melle Laure DEVEAUX, Chargée d'études Environnement Concertation, **RTE**

Effets des courants électriques parasites chez les ruminants, en conditions d'élevage

Mots clés : tension électrique parasite, moutons, vaches laitières, physiologie du stress, comportement, production, imprévisibilité

Effects of stray voltage in ruminants under farm conditions

Keywords: stray voltage, sheep, dairy cows, stress physiology, behaviour, production, unpredictability

Karim Rigalma

Travail réalisé

sous la responsabilité scientifique conjointe de

C. Duvaux Ponter et S. Roussel

UFR Nutrition animale, qualité des produits et bien-être,
Département Sciences de la Vie et Santé, AgroParisTech,

dans le cadre d'un contrat de Recherche Industrie CIFRE,
financé par l'Association de la Recherche Technique (ANRT)
et le Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricite (RTE)

Table des matières

TABLE DES MATIERES	I
REMERCIEMENTS	III
RESUME	V
ABSTRACT	VI
LISTE DES UNITES	VII
LISTE DES ABREVIATIONS	VIII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	X
 AVANT-PROPOS	 1
1. CONTEXTE SOCIAL ET SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	1
2. ARTICULATION DES CHAPITRES DE LA THESE	3
 CHAPITRE 1 - INTRODUCTION GENERALE	 4
1. LES COURANTS ELECTRIQUES PARASITES EN ELEVAGE	5
2. PROBLEMATIQUE GENERALE DE LA THESE	16
2.1. <i>Objectifs de la thèse</i>	16
2.2. <i>Stress</i>	17
2.2.1. Définitions du stress	17
2.2.2. Stress aigu et stress chronique	19
2.2.3. Représentation de l'environnement	21
2.2.4. Rôle de la prévisibilité et contrôlabilité	21
2.2.5. Expérience passée et réactivité émotionnelle	22
2.2.6. Agents stressants en élevage	23
2.3. <i>Electricité</i>	25
2.3.1. Généralités	25
2.3.2. Conséquences de l'exposition à une tension électrique	25
2.3.3. Détermination du niveau de tension appliqué au cours des expérimentations	27
2.4. <i>Conséquences économiques potentielles des tensions parasites en élevage</i>	28
2.5. <i>Méthodologie générale</i>	29
2.5.1. Choix des modèles animaux	29
2.5.2. Justification de la durée des expérimentations à moyen terme	29
2.5.3. Avertissement, applicabilité en conditions d'élevage	30
 CHAPITRE 2 - EFFETS DES COURANTS ELECTRIQUES CHEZ LES OVINS	 31
PREAMBULE	32
1. EFFECTS OF STRAY VOLTAGE ON THE PHYSIOLOGY OF STRESS, GROWTH PERFORMANCE AND CARCASS PARAMETERS IN ROMANE MALE LAMBS	36
2. EST-CE QUE L'EXPERIENCE PASSEE D'UN AGENT STRESSANT PERMET A UNE AGNELLE DE GERER PLUS EFFICACEMENT UNE SITUATION STRESSANTE ?	52

CHAPITRE 3 - EFFETS DES COURANTS ELECTRIQUES CHEZ LES BOVINS..... 58

PREAMBULE	59
1. DETERMINATION OF A STRAY VOLTAGE THRESHOLD IN HOLSTEIN HEIFERS, INFLUENCE OF PREDICTABILITY AND PAST-EXPERIENCE ON BEHAVIOURAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES	65
2. MEDIUM-TERM EFFECTS OF REPEATED EXPOSURE TO STRAY VOLTAGE ON ACTIVITY, STRESS PHYSIOLOGY AND, MILK PRODUCTION AND COMPOSITION IN DAIRY COWS.....	88
3. MEDIUM-TERM EFFECTS OF REPEATED EXPOSURE TO STRAY VOLTAGE ON BEHAVIORAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES IN DAIRY COWS	114

CHAPITRE 4 - DISCUSSION GENERALE..... 132

1. RAPPELS DES PRINCIPAUX RESULTATS.....	133
2. TENSIONS ELECTRIQUES PARASITES, AGENT STRESSANT MODERE EN ELEVAGE ?.....	136
2.1. Variables utilisées	136
2.2. Réponses comportementales et physiologiques à court terme.....	137
2.3. Réponses comportementales et physiologiques à moyen terme.....	138
2.4. Conséquences des tensions électriques sur les performances zootechniques	139
2.4.1. Production laitière.....	139
2.4.2. Production de viande	140
2.5. Comparaison avec d'autres agents stressants rencontrés en élevage.....	141
3. HABITUATION ET ADAPTATION DES ANIMAUX.....	144
3.1. Effet de la familiarité, de l'expérience passée et de l'intensité de l'agent stressant sur le processus d'habituation	144
3.2. Adaptation du comportement en présence de l'agent stressant	145
3.3. Interaction entre adaptation et habituation.....	147
4. IMPREVISIBILITE DES TENSIONS PARASITES ET CONSEQUENCES SUR LES ANIMAUX	149
4.1. Justification du choix de l'étude de l'imprévisibilité.....	149
4.2. Effets de l'imprévisibilité à court et moyen terme	149
4.3. Contournement de l'imprévisibilité.....	151
5. UNE VARIABILITE INDIVIDUELLE DE REPONSE	153
5.1. Résistance corporelle	153
5.2. Réponse individuelle	155
6. LE STRESS, UN FACILITATEUR ?	156
7. IMPLICATIONS DANS LA CONDUITE DE L'ELEVAGE	157
8. PERSPECTIVES	158
8.1. Meilleure caractérisation de la situation en élevage	158
8.2. Des effets différents suivant les caractéristiques des tensions électriques ?	158
8.2.1. Effets de tensions électriques continues.....	158
8.2.2. Application des tensions électriques en salle de traite	159
8.2.3. Effets des tensions électriques en présence d'autres agents stressants.....	159
8.2.4. Effets à moyen terme d'un courant électrique d'intensité plus importante	160
8.2.5. Variabilité individuelle	160

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 162

LISTE DES PUBLICATIONS..... 173

ANNEXES

1. DIFFERENCES ENTRE LES SYSTEMES DE DISTRIBUTION NORD-AMERICAIN ET FRANÇAIS DE L'ELECTRICITE	177
2. EFFECTS OF REPEATED EXPOSURE TO STRAY VOLTAGE ON THE BEHAVIOUR AND THE STRESS PHYSIOLOGY IN ROMANE EWE LAMBS	178
3. ANIMAUX EXPERIMENTAUX	185
4. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	187
5. DOES PAST-EXPERIENCE OF A STRESSOR ENABLE SHEEP TO HANDLE MORE EFFECTIVELY A STRESSFUL SITUATION?	191
6. SYSTEME EMBARQUE DE MESURES DE COURANT TRAVERSANT LES BOVINS	193
7. DETERMINATION OF A STRAY VOLTAGE THRESHOLD USING BEHAVIOURAL MEASUREMENTS IN HOLSTEIN HEIFERS	197

Remerciements

Avant d'être une aventure scientifique, cette thèse est surtout une belle aventure humaine... C'est pourquoi je tiens, puisque la possibilité m'en est offerte, à remercier les très nombreuses personnes que j'ai croisées avant ou au cours de cette thèse.

Mes premiers remerciements sont bien évidemment destinés à Christine pour sa gentillesse et sa disponibilité. Christine, merci de m'avoir fait confiance toutes ces années. *Gratissimus discipulus magistro suo subtilissimo, pro severitate, constantia et brevitate in dicendo quae inculcatae ei sunt*¹.

Toi aussi, Sabine, je te remercie pour ta patience, ta disponibilité, ta gentillesse et les nombreux échanges que nous avons eus. Travailler avec toi est une chance. Il y a très longtemps, je t'avais dit que tu étais un modèle pour moi et je continue à le penser !

Je remercie RTE pour son implication dans le cadre de cette thèse CIFRE et pour sa participation financière aux expérimentations.

Je tiens aussi à remercier Marie-Christine Meunier-Salaün et le Professeur Guy-Pierre Martineau pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail, ainsi que Jocelyne Flament et le Professeur Henri Brugère pour leur participation au jury de thèse.

Je tiens notamment à remercier Marianne et Cyril dont le travail de qualité m'a particulièrement aidé au cours de cette thèse, ils sont devenus au fil du temps des amis. Marianne, quelle chance d'avoir partagé le même bureau ! Je te remercie pour ta bonne humeur au quotidien, tes fous-rire, ta maîtrise d'Observer et la musique du Mouv' mais aussi de m'avoir montré l'exemple à bien des reprises. Cyril, tes discussions passionnées sur l'apiculture m'ont converti, travailler et bricoler avec toi ont été un plaisir, mais pouvait-il en être autrement d'un Ingénieur ZPA de l'ENITAC ? Merci à vous deux !

J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres du Comité de thèse : Alain Boissy, Catherine Disenhaus, Véronique Deiss, Henri Brugère, François Deschamps, Laure Deveaux, Thomas Louyot et Olivier Martin qui ont répondu présents à mes sollicitations et qui ont su partager leur expérience et faire avancer le projet.

Un merci particulier à François Gallouin, pierre angulaire à l'origine de ce projet, dont l'immense savoir n'a d'égal que la gentillesse et la disponibilité.

Je tiens à remercier le Professeur Douglas J. Reinemann, pour l'invitation à la conférence du MREC et pour les précieux échanges que nous avons pu avoir lors de sa visite en France.

Je n'oublie pas de remercier Isabelle Veissier, Alain Boissy, Xavier Boivin et Bernard Rémond de m'avoir fait découvrir en Auvergne, il y a déjà quelques années, l'éthologie appliquée et le Professeur Claude Baudoin de m'avoir accepté en DEA de Biologie du Comportement.

Cette thèse a été le support de plusieurs stages et j'ai eu la chance de partager de bons moments avec Andreia, Coralie, Perrine, Aude, Christelle et Alice. Merci à vous !

Je tiens à remercier l'UMR Physiologie de la Nutrition et Alimentation, notamment le Professeur Daniel Sauvant et je souhaite la bienvenue et beaucoup de réussite dans ses entreprises à Nicolas Friggens. Je remercie L'ADEPRINA pour le soutien apporté à cette thèse.

Merci à toi Olivier toujours disponible et de bonne humeur mais aussi pour cette session « Excel - stats » un certain été 2004 ! Le tableau croisé dynamique est une arme redoutable !

¹ « L'élève est très reconnaissant envers son maître attentif, pour la rigueur, la constance et l'esprit de synthèse qui lui ont été inculqués. » Merci à Driss et au Professeur Henriet pour la traduction en latin.

Sylvie merci pour ta gentillesse, ta maîtrise d'EndNote, que de temps depuis la CL43 ! Jacques, merci pour m'avoir fait découvrir le chocolat 64%, fèves du Pérou, et pour ces échanges fructueux sur un peu tout ou presque. Pierrette, merci pour ton aide précieuse dans la recherche bibliographique et le dépouillement des données. J'espère avoir l'occasion un jour de réutiliser tes créations de haute-couture pour chèvres ! Merci Ophélie pour ta bonne humeur au quotidien et pour les dosages réalisés avec l'aide d'Hugo. Merci Anne d'avoir dépouillé les données vidéo, et désolé pour les « cauchemars de vaches ». Je souhaite bonne continuation à Marion qui m'a montré la voie pendant plusieurs années et à Bérengère, bon courage pour ta rédaction !

Je remercie la Ferme d'AgroParisTech et son directeur Bernard de Franssu pour la disponibilité et l'accueil qui m'ont été réservés. Merci à Damien, Gérard, Jean-Luc et Michael pour leur aide et leurs conseils lors des expérimentations sur les bovins. Merci à Camille pour ses précieux conseils en matière de bricolage. Merci à Pierre pour son aide lors des expérimentations sur les ovins. Un énorme merci à Ludovic pour son aide, ses conseils éclairés en bricolage et sa disponibilité, j'ai été heureux de travailler avec toi. Un grand merci à Dominique pour son aide et sa disponibilité (désolé d'avoir dû te faire lever très tôt pour le curage des vaches). Je te souhaite bon courage et bonne continuation.

Je tiens à remercier EDF R&D pour le prêt du matériel d'acquisition électrique et plus particulièrement François Fortin et Jean-Pierre Gernez, pour s'être déplacés régulièrement sur la ferme et pour leur aide dans la réflexion et la mise en place des installations électriques.

Avant de m'installer rue Claude Bernard, j'ai eu la chance de passer du temps à la Zootechnie de Grignon. Merci Ghislaine, Jean-Luc, Pierre Poissonnet, Antoine et Marie-Claire. Je garde un très bon souvenir de la vie de château, les hivers sont parfois rudes mais le cœur des résidents est chaleureux.

Je tiens à remercier la formidable équipe de la chèvrerie : Joseph, Alexandra, Jérôme, Anne, Marie, Jean-Paul et Jean, qui nous a malheureusement quitté récemment. Merci pour le prêt de la perceuse-visseuse, scie circulaire, scie sauteuse, cintreuse... et pour votre disponibilité lors des expérimentations à la chèvrerie, il y a quelques années déjà.

Je tiens à remercier Andrew Ponter pour sa disponibilité et ses nombreuses relectures d'articles et pour avoir participé à l'expérimentation vaches (j'attends le prochain France-Angleterre avec impatience, d'ailleurs vous faites quoi ce jour-là ?). Je remercie Christine Fisheux pour les innombrables dosages ($> 3.10^3$) qu'elle a réalisés.

Je suis enfin reconnaissant envers tous les agneaux, agnelles, génisses et vaches qui ont accepté de répondre à mes questions. Il s'en trouvait toujours avec des personnalités bien marquées, merci à vous.

Merci à mes amis pour leurs interrogations régulières « *Eh alors tes vaches ? Sinon à part tes moutons, on te voit au Nouvel-An ?* » Merci à vous : Marie-Laure, Bastiou, Magali-poupette, Py, Olivia, Etienne, Ségo, Daminouminet, Ludo & Marion, Ben & Adeline, JP, Nanou & Jérôme, Manu & ses fourmis...

Enfin mon dernier merci, mais pas le moindre s'adressera à mes parents pour leur soutien, leur encouragement et leur grande patience tout au long de mes pérégrinations estudiantines. Sans vous, je ne serais pas celui que je suis aujourd'hui. Merci à mes frères Hassan et Driss & Anne et ma nièce Aléia, je suis désolé de ne pas venir plus souvent vous voir. Je remercie aussi la famille Jaouen qui m'a patiemment écouté lors de mes interminables monologues sur le comportement animal, merci donc à Marie-Louise (Mamie-Lou), Jean (Papi-Tracteur), Céline, Méla & Tony et aussi Ruben, Maël...et Ewen.

Enfin, merci à toi Adèle, pour ton incroyable patience (que de week-end, soirées/nuits, petits matins à passer auprès de mes chèvres, chevreux, moutons et vaches), pour ton soutien indéfectible mais surtout ton amour au quotidien. Merci aussi à Jeanne qui a su faire ses nuits rapidement et qui a accepté de me voir un peu moins souvent ces derniers temps (il est 20h, normalement tu dois être en pyjama, les yeux brillants et de la compote plein le museau), n'oublie pas qu'Utah attend bien sagement dans ton lit.

Résumé

Les tensions électriques parasites sont des tensions de faible niveau (< 10 volts) mesurées entre deux points qu'un animal peut simultanément toucher. Elles ont deux origines, l'une interne, liée aux dispositifs électriques existant en élevage, l'autre externe, imputable aux équipements et réseaux proches de l'exploitation agricole. Les courants électriques créés par ces tensions peuvent circuler dans les structures métalliques de l'élevage. La question des effets des tensions électriques parasites sur les animaux d'élevage est un sujet d'actualité qui intéresse de plus en plus la profession agricole en raison des enjeux économiques qui pourraient en découler.

L'approche expérimentale suivie était multicritère. Elle a consisté à étudier en conditions d'élevage, à court et moyen terme, les réponses comportementales, physiologiques et zootechniques à des tensions électriques appliquées de manière aléatoire ou permanente chez des ovins et des bovins. Une attention particulière a été portée aux conséquences de l'imprévisibilité de l'exposition à la tension électrique, actuellement peu prise en compte dans les études sur les tensions parasites.

A court terme, un seuil de réaction persistante (modification durable du comportement) de 2,3 V (2,6 mA) a été mis en évidence chez des génisses soumises à une tension électrique au niveau d'une mangeoire. Une confrontation antérieure à l'électricité a réduit les réponses de stress des génisses lors d'une nouvelle exposition à la tension. Par contre, une exposition aléatoire (imprévisible) à la tension électrique a rendu plus difficile l'adaptation à court terme des génisses par rapport à une exposition permanente (prévisible). A moyen terme (8 semaines), l'exposition de vaches laitières en lactation à une tension de 1,8 V (3,6 mA) au niveau de leur abreuvoir de manière permanente (prévisible) ou aléatoire (imprévisible, 36 heures par semaine) n'a eu aucun effet sur la quantité de lait produite ni sur sa composition (TB, TP et taux de cellules), hormis une baisse ponctuelle de production laitière le 2^{ème} ou le 3^{ème} jour d'exposition. Certaines réponses comportementales (comportement de buvée) et physiologiques (rythme cardiaque) au cours des deux premières semaines d'exposition à la tension ont mis en évidence une réponse de stress aigu transitoire. Après huit semaines d'exposition, les vaches exposées de manière permanente se sont habituées à la tension. Par contre, les vaches exposées de manière aléatoire ont manifesté des réponses physiologiques de stress et des modifications du comportement ce qui pourrait indiquer la présence d'un stress chronique modéré dû à la tension électrique imprévisible.

A moyen terme (6 semaines), l'exposition répétée à une tension de 3,5 V (2,4 mA) appliquée de manière permanente ou aléatoire au niveau de l'abreuvoir, n'a eu d'effet ni sur la croissance ni sur l'ingestion d'eau d'agneaux en croissance. Cependant, un nombre moins important de carcasses grasses, une plus faible concentration plasmatique en cortisol lors de l'abattage et un poids plus important des médullo-surrénales, suggèrent que l'exposition de manière permanente à une tension électrique pourrait induire une modification à moyen terme de la physiologie du stress chez l'agneau.

Chez les agnelles et les vaches laitières, les épreuves mises en place pour étudier la modification de la réactivité émotionnelle et de la motivation ont montré que l'exposition à moyen terme à un agent stressant modéré pourrait faciliter l'adaptation ultérieure de l'animal à une situation nouvelle de challenge.

En élevage, les tensions électriques parasites de faible niveau peuvent être considérées comme un agent stressant modéré n'influençant pas les performances de production mais générant une réponse de stress aigu transitoire et une éventuelle réponse de stress chronique modéré en cas de présence imprévisible des tensions parasites. Une grande variabilité individuelle de réponse a cependant été observée.

Mots clés : *tension électrique parasite, moutons, vaches laitières, physiologie du stress, comportement, production, imprévisibilité*

Abstract

Stray voltage is a low voltage (less than 10 V) which can be measured between two points which simultaneously come into contact with an animal. Stray voltage has two origins: an on-farm origin, due to electrically powdered machines and an off-farm origin due to the electrical surroundings of the farm. Currents created by this voltage can flow through the metallic structure of farm equipment. The subject of stray voltage in farm animals is a topic which generates much interest in the agricultural community because of its potential effects on farm economics.

A multi-criteria experimental approach was used. It consisted of studying, under farm conditions, the short and medium-term effects of permanently or randomly applied voltage on behaviour and, physiological and performance responses in sheep and cattle. Specific emphasis was placed on the consequences of unpredictability of voltage exposure, which has been rarely studied when dealing with stray voltage.

In the short-term, a persistent reaction threshold (lasting change in behaviour) of 2.3 V (2.6 mA) was observed in heifers subjected to voltage applied to a feeder. Past experience of electricity reduced the stress responses of the heifers subsequently exposed to voltage. However, in the short-term, random (unpredictable) voltage exposure did not allow heifers to adapt to the situation compared to heifers submitted to permanent (predictable) voltage exposure. In the medium-term (8 weeks), the exposure of lactating dairy cows to a voltage of 1.8 V (3.6 mA) applied to their water trough in a permanent (predictable) or in a random (unpredictable, 36 hours/week) manner affected neither milk yield nor milk quality (fat and protein content and somatic cell counts) although a transient decrease in milk yield was observed on the 2nd or the 3rd day of exposure. Some behavioural (drinking behaviour) and physiological responses (heart rate) during the first two weeks of exposure demonstrated a transient acute stress response. After eight weeks of exposure, cows permanently exposed became habituated to voltage while cows randomly exposed still showed physiological stress responses and behavioural changes. This could indicate a mild chronic stress due to the unpredictability of voltage exposure.

In the medium-term (6 weeks), repeated exposure to 3.5 V (2.4 mA) applied permanently or randomly to the water trough had no effect on growth and water consumption of growing-finishing lambs. However, fewer fat carcasses, a lower plasma cortisol concentration at slaughter and a higher adrenal medulla weight, suggested that permanent exposure to voltage could induce medium-term changes in the stress physiology of lambs.

In lambs and dairy cows, the challenges designed to investigate emotional reactivity and motivation showed that, in the medium-term, exposure to a mild stressor could favour the subsequent adaptation of the animals to a new challenging situation.

In farms, stray voltage can be considered as a mild stressor with no impairment of production performance but with a transient acute stress response and a possible mild chronic stress response in the case of unpredictable exposure. However, large variability in individual responses was observed in the present experiments.

Keywords: *stray voltage, sheep, dairy cows, stress physiology, behaviour, production, unpredictability*

Liste des unités

A : ampère

dB : décibel

Hz : hertz

mA : milliampère (=0,001 ampère)

mV : millivolt (=0,001 volt)

ng.mL⁻¹ : nanogramme / millilitre

V : volt

Liste des abréviations

ACTH : AdrenoCorticoTropin Hormone ou hormone adrénocorticotrope

CEM : Champ Electro-Magnétique

CISTEME : Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, en ElectroMagnétisme et en Electronique

CRH : Cortico-Releasing-Hormone ou corticolibérine

CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche

EDF : Electricité de France

EDF R&D : Electricité de France Recherche & Développement

GMQ : Gain Moyen Quotidien

GPSE : Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique dans les élevages agricoles et aquacoles

HPA axis : Hypothalamo-Pituitary Adrenal axis ou axe corticotrope

IA : Insémination Artificielle

IAF : Insémination Artificielle Fécondante

INA P-G : Institut National Agronomique Paris-Grignon, devenu **AgroParisTech** depuis le 1^{er} janvier 2007

ISAE : International Society for Applied Ethology, Société Internationale d'Ethologie Appliquée

RTE : Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité, filiale d'EDF depuis le 1^{er} septembre 2005

PNMT : Phényléthanolamine N-Méthyl Transférase

TB : Taux Butyreux

TP : Taux Protéique

TH : Tyrosine Hydroxylase

SLT : Schéma de Liaison à la Terre anciennement appelé régime de neutre

UFR : Unité de Formation et de Recherche

Liste des tableaux

Tableau 1. Exemples d'indicateurs utilisés dans l'évaluation des réponses de stress aigu et de stress chronique chez les animaux d'élevage. Les indicateurs utilisés au cours de cette thèse sont en caractères gras.....	20
Tableau 2. Réponses comportementales et physiologiques à court terme de génisses soumises à des tensions électriques et effets de l'expérience et de l'imprévisibilité.....	133
Tableau 3. Principales réponses physiologiques et performances de production d'agneaux soumis à une tension électrique répétée et effets de l'imprévisibilité. Les réponses comportementales et physiologiques des agnelles sont en cours de dépouillement.	134
Tableau 4. Principales réponses comportementales, physiologiques et performances de production de vaches laitières soumises à une tension électrique répétée au niveau de leur abreuvoir et effet de l'imprévisibilité.....	135
Tableau 5. Influence de différents agents stressants (facteurs environnementaux) sur les réponses comportementales, physiologiques et les paramètres de production chez les bovins.	142
Tableau 6. Influence de différents agents stressants (facteurs sociaux) sur les réponses comportementales, physiologiques et les paramètres de production chez les bovins.....	143

Liste des figures

Figure 1. Organisation de l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, encore appelé axe corticotrope ou axe HPA.	18
Figure 2. Biosynthèse des catécholamines à partir de la tyrosine.	18
Figure 3. Expérimentations conduites sur les effets des courants électriques chez les ovins..	33
Figure 4. Evolution moyenne au cours de la buvée du courant traversant le corps des vaches soumises à une tension électrique de 1,8 V au niveau de leur abreuvoir. Dix mesures électriques réparties régulièrement sur la durée de la buvée ont été effectuées au cours des épisodes de buvée (n = 28 vaches, soit 79 buvées, moyenne \pm erreur standard).	147
Figure 5. Adaptation comportementale et habituation à moyen terme de vaches laitières soumises pendant 8 semaines à une tension électrique (1,8 V soit 3,6 mA) au niveau de leur abreuvoir, soit de manière permanente (prévisible), soit de manière aléatoire (imprévisible, 36 heures/semaine). En cas d'exposition permanente, l'intensité du stimulus est réduite par l'adaptation comportementale mais la fréquence du stimulus reste élevée - les animaux peuvent s'habituer. En cas d'exposition aléatoire, l'intensité du stimulus est réduite par l'adaptation comportementale mais la fréquence du stimulus reste faible et irrégulière - les animaux ne s'habituent pas.	148
Figure 6. Profil théorique des réponses de stress chez des vaches exposées à une tension électrique prévisible ou imprévisible au niveau de l'abreuvoir. Les flèches représentent les temps auxquels des mesures ont été réalisées.	151
Figure 7. Variabilité de la résistance du complexe mangeoire-génisse-plaque métallique lors de l'application de 2,3 V et du complexe abreuvoir-vache-plaque métallique lors de l'application de 1,8 V. L'étendue interquartile (\square), la médiane (—), la moyenne (\bullet) et l'intervalle de confiance ($ $) sont représentés.	153
Figure 8. Variabilité inter individuelle de réponse de deux génisses soumises à une tension électrique au niveau de la mangeoire (de 0 à 5 V par palier quotidien de 0,33 V). Les variables observées sont le pourcentage d'aliment ingéré dans la mangeoire électrifiée (histogrammes) au cours des 2 minutes de test et la latence (courbe) pour ingérer du concentré dans la deuxième mangeoire (non électrifiée).	155

Avant-propos

1. Contexte social et scientifique de l'étude

En 1997, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche a été saisi par des représentants de la profession agricole suite à la possibilité d'une influence négative de l'électricité sur leurs élevages liée à la présence d'une ligne à haute tension à proximité. Le Ministère a alors commandité un rapport d'étude sur l'influence des champs électriques et magnétiques (CEM) dans les élevages (Blatin et Benetière 1998). Ce rapport indique notamment que les lignes de distribution et de transport d'électricité peuvent être à l'origine de courants et tensions parasites au niveau des installations agricoles et des bâtiments avoisinants, mais que ces phénomènes électriques (générés par induction) ne sont pas différents de ceux générés par des installations électriques non conformes.

A la suite de ce rapport, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et Electricité de France (EDF) ont signé en 1999 le premier protocole GPSE : Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique dans les élevages agricoles et aquacoles. Les participants réguliers de ce GPSE sont des représentants du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, de RTE (gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité), de la profession agricole, de Promotélec (association pour la promotion de la sécurité et la qualité des installations électriques dans le bâtiment), de Groupama (compagnie d'assurance) et des enseignants de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort et d'AgroParisTech (anciennement INA P-G, Institut National Agronomique Paris-Grignon). Le GPSE est un groupe d'expertise multidisciplinaire dont l'objectif principal est de promouvoir la sécurité électrique dans les exploitations agricoles (revue de Gallouin 2002). Le GPSE a été notamment chargé de rédiger un document de vulgarisation sur les dangers de l'électricité à l'usage des agriculteurs ainsi que de mettre en place une méthodologie pour régler les problèmes éventuels liés à la présence de tensions électriques parasites dans les élevages.

Depuis plusieurs décennies (Churchward 1948), dans les pays anglo-saxons, la question des tensions ou courants électriques parasites en élevage préoccupe le monde agricole, les fournisseurs d'électricité et les scientifiques. Des pics de tensions électriques (jusqu'à 10 volts) peuvent être mesurés au sein de l'élevage au niveau des masses métalliques (barrières, abreuvoirs, auges, salle de traite...) (revue de Brugère 2002). De plus, aux Etats-Unis et au Canada, les effets des tensions électriques sur les vaches laitières et les porcs ont fait l'objet d'un nombre important de publications (chapitre 1).

En France, la présence des tensions électriques parasites en élevage est une réalité à laquelle peuvent être confrontés les exploitations (revue de Brugère 1993, Lasseret 2001, Dénès 2007). Cependant, les niveaux de tensions électriques parasites mesurés dans les élevages français semblent moins importants (de l'ordre du volt) que ceux mesurés dans les pays anglo-saxons.

Ceci pourrait être lié aux différences entre les modes de distribution électrique anglo-saxons et européens (annexe 1). La particularité des réseaux anglo-saxons est de posséder une connexion du neutre à la terre mais aussi une liaison entre neutre primaire et secondaire dans les transformateurs abaisseurs de tension de fin de ligne. Ainsi, des fluctuations sur le neutre en dehors de l'élevage peuvent être ressenties à l'intérieur de celui-ci (revue de Brugère 2002). Fort de ce constat et du manque de données scientifiques spécifiques aux conditions françaises et afin de répondre aux inquiétudes de la profession agricole, RTE a proposé un partenariat de recherche appliquée à AgroParisTech. Les premières expérimentations sur le sujet ont ainsi été conduites chez des moutons (Duvaux-Ponter *et al.* 2005, 2006). Ce partenariat s'est ensuite renforcé avec la mise en place d'une thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche). Les objectifs de cette thèse ont été discutés dans le cadre d'échanges entre le GPSE (relai de la profession agricole), RTE et AgroParisTech, ce dernier étant en charge de l'encadrement scientifique du projet.

Les élevages laitiers semblent être les plus touchés par les tensions ou courants électriques parasites (revue de Brugère 1993, Lasseret 2001, Dénès 2007). Les éleveurs qui constatent une dégradation de la qualité du lait, de l'état de santé des animaux mais également l'apparition de perturbations comportementales (évitement de certains lieux, modification du comportement de buvée...) mettent parfois en cause les tensions électriques parasites. Par conséquent, un des objectifs majeurs de cette thèse était de travailler sur le modèle vaches laitières.

De plus, aujourd'hui, la réglementation européenne en vigueur prend en compte le bien-être des animaux dans les élevages. Parmi les cinq libertés proposées par le Farm Animal Welfare Council (1992) pour définir le bien-être en élevage, on trouve l'absence de peur et d'anxiété ainsi que l'absence de douleur et la possibilité d'exprimer les comportements normaux de l'espèce. Une caractéristique majeure du bien-être est sa nature multidimensionnelle couvrant des aspects aussi différents que la bonne santé de l'animal ou sa capacité à ressentir des émotions positives. De par sa nature multidimensionnelle, l'utilisation de plusieurs critères est nécessaire à l'évaluation du bien-être des animaux d'élevage. En raison de leur plus grande sensibilité, les critères comportementaux sont particulièrement intéressants en complément des critères physiologiques, zootechniques et sanitaires plus classiquement rencontrés (Meunier-Salaün *et al.* 1987, revue de Veissier *et al.* 1999). Cependant, les critères comportementaux peuvent rarement être utilisés en dehors d'un cadre expérimental contrôlé. Au-delà d'enjeux économiques potentiels en cas de baisse de production ou de détérioration de la qualité du lait liées à la présence de tensions électriques parasites, nos travaux peuvent également se rattacher au contexte de la prise en compte du bien-être animal en élevage qui est une préoccupation à la fois du monde agricole et de notre société.

En accord avec la définition des tensions électriques parasites donnée par des chercheurs et des universitaires américains (Lefcourt 1991) (chapitre1), nous avons limité le cadre de cette thèse à des tensions maximales de 10 volts.

2. Articulation des chapitres de la thèse

Le premier chapitre de cette thèse fera le point sur l'état des connaissances sur les courants électriques parasites en élevage et s'attachera à préciser certaines notions puis à présenter les objectifs visés ainsi que la méthodologie employée. Deux modèles animaux seront étudiés : les ovins et les bovins.

Le deuxième chapitre présentera les résultats d'une expérimentation à moyen terme sur les effets de la tension électrique sur la physiologie du stress et la qualité des carcasses chez les agneaux mâles ainsi que les résultats concernant les modifications potentielles de la motivation à ingérer un renforcement dans une situation de test ainsi que la représentation d'un lieu potentiellement chargé négativement sur le plan des émotions (réactivité émotionnelle) chez des agnelles soumises à une tension électrique à moyen terme.

Le troisième chapitre sera consacré aux bovins. Dans un premier temps, les résultats concernant une expérimentation à court terme chez la génisse portant sur la détermination du seuil de réaction aux tensions électriques et les effets de l'expérience passée et de l'imprévisibilité seront présentés. Dans un second temps, les effets d'une tension électrique à moyen terme sur les réponses comportementales et physiologiques ainsi que sur la production laitière seront détaillés.

L'ensemble des résultats obtenus au cours de cette thèse sera synthétisé et discuté dans le quatrième chapitre par rapport à la littérature existante et par rapport aux observations de terrain. Enfin, des propositions de recherche future seront développées.

L'expression anglo-saxonne « stray voltage » se traduit par l'expression française « tension électrique parasite ». Or, l'animal est sensible au courant électrique et non à la tension elle-même (chapitre 1). Cependant, comme nous avons appliqué des tensions électriques lors de nos expérimentations, nous utiliserons principalement dans la suite du document l'expression « tension électrique ».

Chapitre 1 - Introduction générale

1. Les courants électriques parasites en élevage

Inra Prod. Anim., 2009,
22 (4), 291-302

Les courants électriques parasites en élevage

K. RIGALMA, C. DUVAUX-PONTER, F. GALLOUIN, S. ROUSSEL

AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

Courriel : rigalma@agroparistech.fr

L'électricité est indispensable à l'élevage moderne. Cependant, des phénomènes non désirés comme les tensions électriques parasites (< 10 volts), d'origine interne ou externe à l'exploitation agricole, peuvent apparaître. Quelles sont leurs conséquences sur le comportement, la physiologie du stress et les performances zootechniques des animaux de rente.

En France, entre 1830 et 1950, l'essor du machinisme et la diffusion des nouvelles formes d'énergie ont joué un rôle clef dans les progrès de l'agriculture (Jussiau *et al* 1999). L'énergie électrique a contribué à ce progrès en offrant un large panel de machines et d'appareils, capables de fonctionner en continu. Ces machines électriques se sont substituées à l'homme pour un nombre croissant d'opérations. L'élevage moderne et ses nouveaux équipements (robot de traite, distributeur automatique de concentrés, gestion électronique du troupeau...) font désormais largement appel à l'électricité. Ainsi, aujourd'hui, en élevage laitier, 20% de l'énergie totale nécessaire à la production de 1000 litres de lait sont d'origine électrique (Beguín *et al* 2008). Le bloc traite (tank à lait, chauffe-eau et pompe à vide) représente 85% de la consommation électrique d'une exploitation laitière, l'éclairage étant un poste secondaire (Galan *et al* 2007).

Une étude bibliographique permet de situer dans les années 40, en Australie, les premières observations impliquant des tensions électriques en salle de traite comme agent stressant chez la vache laitière (Churchward 1948). Il faut cependant attendre le début des années 80 pour voir publier, en Amérique du Nord, les premières études relatives aux effets des tensions électriques parasites sur les animaux de rente. En France, la question des effets des tensions électriques parasites chez les animaux d'élevage émerge au début des années 90 (Brugère 1993, Blatin et Benetière 1998). L'expression anglo-saxonne «*stray voltage*», utilisée pour décrire ce phénomène, se traduit par l'expression française «tension élec-

trique parasite». Or, l'animal est sensible au courant et non à la tension elle-même (Norell *et al* 1983, Hultgren 1990). C'est pourquoi d'autres expressions sont utilisées comme «*stray current*» ou «*transient current*» («courant vagabond» ou «courant transitoire»). Dans les expérimentations, les auteurs ont appliqué soit une tension électrique (exprimée en volts, V), soit un courant électrique (exprimé en milliampères, mA).

La définition des tensions électriques parasites, donnée par des chercheurs et des universitaires américains suite à la demande du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (Lefcourt 1991), est la suivante : «*Une tension électrique parasite est une tension de faible amplitude (inférieure à 10 volts), mesurée entre deux points qu'un animal peut simultanément toucher. Parce que l'animal répond au courant produit par la tension et non pas à la tension elle-même, la source de la tension parasite doit être capable de produire un courant électrique*».

Dans les élevages d'Amérique du Nord, les tensions électriques parasites sont principalement dues au mode de distribution de l'électricité : la mise à la terre des clients est reliée à la mise à la terre et au neutre du réseau de distribution (Hydro-Québec 2005). En Europe cela varie d'un pays à l'autre. En France, par exemple, le neutre et la mise à la terre du réseau de distribution sont reliés ensemble mais pas à la mise à la terre du client.

Ainsi, en Amérique du Nord, contrairement à la situation européenne, des fluctuations de courant extérieures à

l'exploitation peuvent produire des pics de tensions à l'intérieur de cette dernière. Une enquête menée auprès de 140 exploitations laitières en Ontario (Canada) a montré que 21% des exploitations enquêtées étaient touchées par des tensions électriques parasites supérieures à 1 V (Rodenburg 1998). En Europe, bien que le mode de distribution de l'électricité soit différent, la présence de tensions électriques parasites est avérée au sein des exploitations agricoles (Lasseret 2001, Gallouin 2002).

Enfin, la question des effets des tensions électriques parasites en élevage possède une dimension polémique. En effet, certains éleveurs, confrontés à des problèmes non résolus et pour lesquels aucune explication n'a pu être validée, mettent en cause la présence de courants électriques parasites au sein de leur élevage (Brugère 2006, Gallouin 2009).

Après avoir présenté les origines des tensions électriques parasites en élevage, l'objectif de cette revue est de montrer les conséquences des tensions électriques parasites sur le comportement, la physiologie et les performances zootechniques des espèces de rente. Nous nous appuierons principalement sur les résultats des expérimentations ayant eu lieu en Amérique du Nord, en raison du faible nombre d'expérimentations réalisées en France, les principaux modèles d'études étant la vache laitière et le porc. Les résultats des expérimentations nord-américaines sont cependant transposables à l'Europe (courant sinusoïdal, de fréquences voisines : 60 Hz aux USA et 50 Hz en Europe).

1 / Tensions électriques parasites en élevage

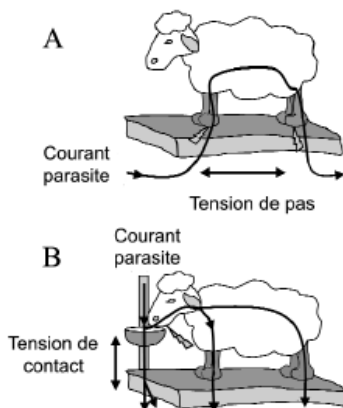
1.1 / Origines

En élevage, les équipements électriques et le matériel agricole sont soumis aux intempéries, à l'humidité, aux poussières, aux chocs et à la corrosion notamment par les lisiers, les aliments et les engrais. Tous ces facteurs accélèrent leur dégradation et augmentent donc les risques d'incidents d'origine électrique. Dans les conditions d'élevage, les animaux peuvent être soumis à deux types de tensions électriques parasites : les tensions de pas et les tensions de contact. Les tensions de pas surviennent lorsqu'un courant s'établit entre les membres antérieurs et postérieurs d'un animal (figure 1A). Les tensions de contact apparaissent au contact d'un élément (par exemple un abreuvoir, figure 1B) : un courant traverse alors l'animal et revient au sol par les pattes (Bourget *et al* 2000). Les tensions électriques parasites ont principalement deux origines : une origine interne liée à l'activité de l'élevage comme le couplage électrochimique, la décharge électrostatique ou le courant de fuite, et une origine externe comme le couplage inductif ou capacitif imputables aux équipements et réseaux proches de l'exploitation agricole (Deschamps 2002).

a) Origines internes

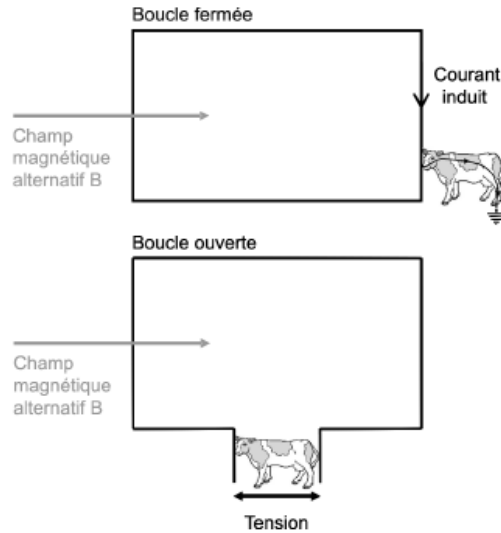
Dans le cas d'un couplage électrochimique, des produits comme les engrais

Figure 1. Deux types de tensions électriques parasites coexistent en élevage : les tensions de pas (A) et les tensions de contact (B).



Inra Productions Animales, 2009, numéro 4

Figure 2. Principe du couplage inductif dans une structure métallique.



chimiques et le lisier se comportent dans un sol humide comme l'électrolyte d'une batterie. En présence de masse métallique, il se produit une migration de charges positives et négatives. Ainsi, un sol initialement isolant peut devenir conducteur. Ceci se traduit par l'apparition de tensions électriques continues de faible niveau (jusqu'à 1 ou 2 V) entre des éléments métalliques.

La décharge électrostatique correspond à l'évacuation instantanée à la terre d'une charge d'électricité statique accumulée sur des matériaux, le plus souvent suite à des frottements (ex. courroies isolantes, tapis roulants...).

Un courant de fuite est un courant dont l'apparition est liée à l'utilisation d'un appareil électrique (ex. démarrage d'une pompe, de la machine à traire...). La protection contre les courants de fuite repose essentiellement sur le câblage du fil de terre qui constitue un chemin privilégié pour leur écoulement. Le défaut de mise à la terre, c'est-à-dire le raccordement défectueux ou inexistant des installations électriques à la terre, est une des principales causes de tensions électriques parasites en élevage (Brugère 1993, Lasseret 2001, Deschamps 2002). Ainsi, le courant de retour des clôtures électriques ou les courants de fuite des machines circulent dans le sol et les bâtiments, et induisent des différences de potentiel entre des structures métalliques non connectées entre elles.

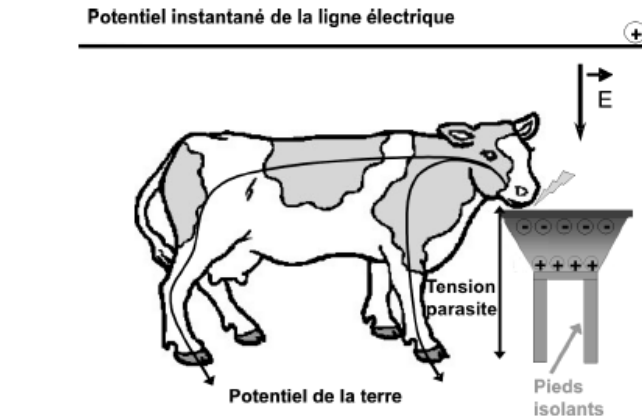
b) Origines externes

Les champs électromagnétiques produits par les équipements ou par les réseaux (EDF, SNCF, télécommunications) peuvent interférer avec des structures métalliques avoisinantes qui se comportent alors comme des antennes. Les phénomènes de couplage créés sont de deux types : le couplage inductif, dont la source est un champ magnétique, et le couplage capacitif, généré par un champ électrique. Dans le cas d'un couplage inductif, le champ magnétique induit des tensions et des courants dans toutes les structures métalliques formant une boucle, selon le principe présenté dans la figure 2. Dans le cas du couplage capacitif, le champ électrique provoque une migration des charges électriques à la surface des conducteurs isolés du sol, d'où la création d'une différence de potentiel. Lorsque l'animal entre en contact avec le conducteur, la migration des charges électriques vers le sol est réalisée via le corps de l'animal (figure 3).

1.2 / Résistance tissulaire et corporelle

L'animal étant sensible au courant, et non à la tension, la résistance électrique joue un rôle important dans l'effet des tensions électriques parasites sur les animaux d'élevage. Ainsi, selon la Loi d'Ohm, l'intensité du courant (I , exprimée en ampères) est dépendante de la tension (U , exprimée en volts) et de la résistance du corps de l'animal

Figure 3. Principe du couplage capacitif d'une ligne électrique (par son champ électrique E) sur un abreuvoir métallique isolé du sol (d'après Bourget et al 2000).



(R , exprimée en ohms, Ω) selon l'équation $U = R \times I$.

a) Tissus et résistance électrique

Les propriétés électriques des tissus biologiques sont complexes et varient

considérablement en fonction de la nature du tissu, de la permittivité relative (réponse d'un milieu donné à un champ électrique), de la conductivité et de la température. Ainsi, Geddes et Baker (1967) ont observé que la résis-

tance des liquides et de la très grande majorité des tissus diminue lorsque la température augmente. Ces auteurs ont également conclu que les liquides sans cellules (urine, liquide amniotique, plasma) ont les plus faibles résistances électriques alors que les poumons, le tissu adipeux et les os sont de mauvais conducteurs.

b) Résistances corporelles chez différentes espèces

La résistance des corps varie en fonction de l'espèce : les volailles ont une résistance électrique totale plus élevée que les ovins, les porcins et les bovins (figure 4).

Le tableau 1 présente, selon le trajet parcouru, les valeurs de résistance électrique chez la vache laitière obtenues avec des électrodes, c'est-à-dire avec de faibles résistances de contact. En Amérique du Nord, il a été admis, dans un but de simplification sur le terrain, de fixer (estimation) la résistance corporelle de la vache à 1000 ohms dans les cas les plus fréquents et à 500 ohms dans les conditions les plus défavorables (milieu humide, trajet à travers l'animal offrant la plus faible résistance, faibles résistances de contact...) (Brugère 2002). Cependant, des mesures réalisées en condition d'élevage chez des génisses laitières (tension parasite appliquée à une mangeoire métallique, l'animal étant sur une plaque métallique) ont donné une résistance de l'ensemble mangeoire-animal-sol plus élevée : en moyenne 1407 ohms mais avec une grande variabilité, de 115 à 4038 ohms (Rigalma, résultats non publiés).

Chez les porcins, Robert *et al* (1993) ont observé que la résistance totale (groin-onglons) de porcs âgés de 9 à 22 semaines logés sur un sol humide ou un sol sec variait de 569 à 2786 ohms (figure 5).

Les ovins, peu étudiés, présentent des résistances électriques plus élevées que les bovins et les porcins. Chez des agnelles âgées de quatre mois et demi, l'application d'une tension électrique à une mangeoire métallique, l'animal étant sur une plaque métallique, a entraîné une grande variabilité de la résistance mangeoire-animal-sol : de 1320 à 9100 ohms (Roussel, résultats non publiés).

Les volailles présentent une résistance électrique totale (bec-pattes) beaucoup plus élevée que les autres animaux de rente, supérieure à

Figure 4. Résistances corporelles (en $k\Omega$) des espèces animales de rente mesurées entre le mufle ou le bec et les membres au moyen d'électrodes (bovins) ou en conditions d'élevage (porcins, ovins, poules et dindes) ($1 k\Omega = 1000 \Omega$) (d'après Appleman et Gustafson 1985, Halvorson et al 1989, Robert et al 1993, Vidali et al 1995, Roussel résultats non publiés).

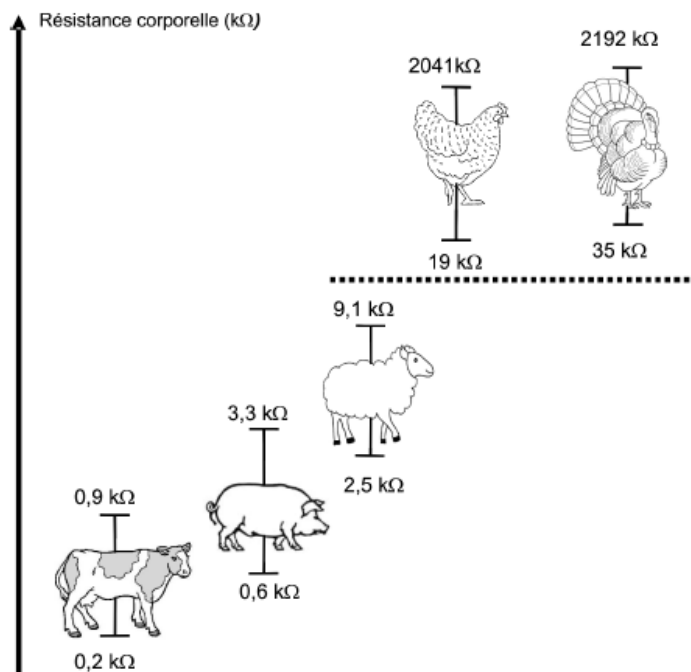


Tableau 1. Valeur moyenne et étendue de la résistance électrique de la vache laitière selon le trajet parcouru par le courant électrique.

Trajet	n*	Moyenne (Ω)	Etendue (Ω)	Fréquence* (Hz)	Références
Mufle - sabots	70	350	324-393	60	(Craine 1975)
	28	359	244-525	60	(Norell <i>et al</i> 1983)
Sabots antérieurs - sabots postérieurs	28	738	496-1152	60	(Norell <i>et al</i> 1983)
Trayon - sabots	28	600	402-953	60	(Norell <i>et al</i> 1983)
	4	880	640-1150	50	(Whittlestone <i>et al</i> 1975)

*n = nombre d'individus testés. + fréquence du courant du secteur.

18 800 ohms chez la poule pondeuse (Vidali *et al* 1995) et supérieure à 35 000 ohms chez le dindonneau (Halvorson *et al* 1989). Ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par la résistance élevée présentée par les pattes et le bec de ces animaux.

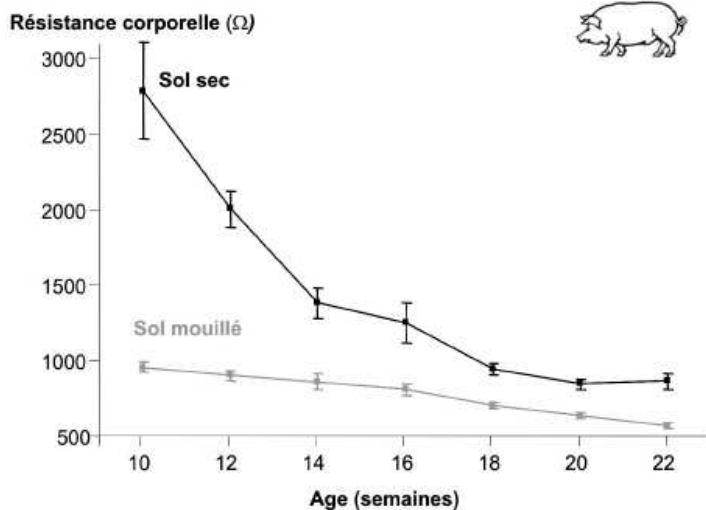
La résistance électrique du corps humain varie de 1000 à 5000 ohms en conditions sèches et de 650 à 1000 ohms en conditions humides (AFNOR 1956). Cependant, en élevage, l'éleveur porte des chaussures ou des bottes en caoutchouc qui augmentent sa résistance et donc son seuil de perception du courant électrique. Ces éléments peuvent expliquer au moins en partie la difficulté à diagnostiquer la présence de tensions électriques parasites dans l'élevage.

c) Facteurs de variations de la résistance corporelle des animaux en élevage

Dans les conditions habituelles d'élevage, de nombreux facteurs font varier la résistance propre de l'animal. Ainsi, la résistance électrique diffère chez la vache laitière suivant le trajet parcouru par le courant (tableau 1). Certaines parties du corps de l'animal sont des points d'entrée et de sortie privilégiés pour le courant électrique : la bouche, le mufle, la tête, l'encolure, la mamelle, les pattes et les sabots (Brugère 2002). Les points d'entrée et de sortie du courant offrent des résistances électriques de contact qu'il faut aussi prendre en compte (figure 6). En effet, Robert *et al* (1994b) ont montré que la résistance corporelle interne des animaux ne représentait qu'une faible partie de la résistance corporelle totale par rapport aux résistances

des points de contact (entrée et sortie). Le poids peut également faire varier la résistance électrique corporelle. Ainsi, la prise de poids (et l'augmentation concomitante de la pression podale) diminue la résistance électrique corporelle totale des porcs à l'engrais (figure 5) (Robert *et al* 1993). Au cours de l'engraissement, le porc présente donc de moins en moins de résistance aux courants électriques parasites.

Les conditions environnementales contribuent également à faire varier la résistance corporelle. Robert *et al* (1993) ont ainsi montré que la présence d'humidité au sol (caillebotis humide vs caillebotis sec) diminue la résistance corporelle totale chez le porc (figure 5). Par ailleurs, chez cette même espèce, Valiquette *et al* (1994) ont observé qu'un sol recouvert d'urine diminuait la résistance du point de contact onglons-sol. Cependant, chez la vache laitière, Norell *et al* (1983) n'ont pas observé de différences de résistance électrique selon que celle-ci était mesurée dans des conditions sèches (sabots brossés et secs) ou humides (sabots lavés et sol humidifié). De plus, Halvorson *et al* (1989) ont montré que l'ajout de vitamines et d'électrolytes à l'eau de boisson, afin de simuler un traitement médicamenteux (chez les volailles), réduisait de moitié la résistance de l'eau. La fréquence du courant électrique est également un facteur influençant la résistance corporelle des animaux de rente, celle-ci diminuant lors de l'augmentation de la fréquence du courant électrique (Matte *et al* 1992, Robert *et al* 1994a).

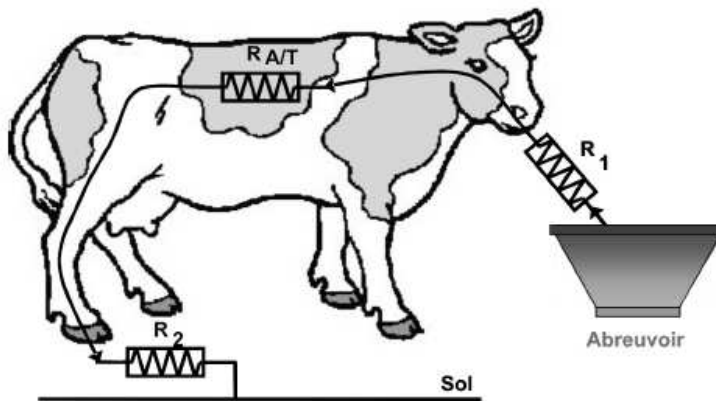
Figure 5. Evolution de la résistance corporelle (ohms, moyenne \pm écart-type) de porcs au cours de leur croissance en fonction du type de sol (sec vs mouillé) (d'après Robert *et al* 1993).

2 / Conséquences des tensions électriques parasites sur les animaux de rente

2.1 / Seuils de réponses

Chez l'homme, les seuils de réponse au courant électrique (de fréquence

Figure 6. Lors de la buvée, le courant qui traverse l'animal du mufle aux sabots postérieurs est fonction du montage en série de la résistance de contact R_1 (entre l'abreuvoir et le mufle), de la résistance de l'animal (qui est fonction du trajet, $R_{A/T}$) et de la résistance de contact R_2 (entre les sabots et le sol).



50-60 Hz) sont bien connus et sont intégrés dans la prévention des risques électriques dans le monde du travail (INRS 2007). La perception cutanée a lieu à partir de 0,5 mA. De 0,5 à 10 mA aucun effet physiologique dangereux n'est observé. Au-delà de 10 mA, en fonction de la durée du contact, les réponses vont de la contraction musculaire à la fibrillation ventriculaire et jusqu'à l'arrêt cardiaque (40 mA pendant 5 secondes, 50 mA pendant 1 seconde ou 500 mA pendant 10 millisecondes). Ces valeurs moyennes cachent cependant une variabilité individuelle de réponse très importante, chez l'homme comme chez l'animal.

Pour les animaux d'élevage, les seuils de réponses aux tensions électriques parasites sont plus difficiles à apprécier et les auteurs adoptent diverses procédures expérimentales pour les mesurer. Ainsi, chez des vaches laitières, Norell *et al* (1983) ont utilisé la suppression d'une réponse conditionnée (appui sur un plateau métallique pour obtenir du concentré) pour déterminer le seuil de réaction au courant électrique. L'augmentation progressive de la tension électrique appliquée sur une mangeoire métallique a été utilisée pour déterminer le seuil de réaction chez la brebis (Duvaux-Ponter *et al* 2005), chez l'agneille (Duvaux-Ponter *et al* 2006) et chez la génisse (Roussel *et al* 2007), le courant circulant alors du mufle vers les sabots. Reinemann *et al* (1999b) ont également soumis des vaches laitières à une augmentation progressive de courant entre le museau et les sabots afin de déterminer leur seuil de réaction.

Les seuils de réaction à la tension ou au courant électrique sont particulièrement dépendants des conditions expérimentales dans lesquelles ils ont été obtenus. Ainsi, le seuil de réaction d'agnelles soumises à des tensions électriques est plus facile à déterminer si l'animal a la possibilité de passer d'une mangeoire électrifiée à une mangeoire non-électrifiée que si seule la mangeoire électrifiée lui est proposée (Duvaux-Ponter *et al* 2006). De même, chez le porc, l'absence de choix augmente la quantité de courant électrique nécessaire pour provoquer une modification du comportement de buvée (Gustafson *et al* 1986).

Trois types de seuils de réponses aux tensions électriques parasites pourraient être définis chez les animaux d'élevage : i) Un seuil de sensation : l'animal prend conscience au travers de ses sens de la présence du courant électrique sans modification visible de son comportement. Les outils de recherche actuels ne permettent pas de déterminer le niveau exact de ce seuil ; ii) Un seuil de réaction transitoire : la réaction de l'animal se traduit par une modification comportementale et/ou physiologique ponctuelle ; iii) Un seuil de réaction persistante : à partir de ce niveau de tension, l'animal modifie son activité de manière durable.

Dans le cadre des études concernant les effets des agents stressants sur le bien-être des animaux de rente, il est généralement admis, qu'en raison de leur plus grande sensibilité, les critères comportementaux sont particulièrement intéressants en complément des

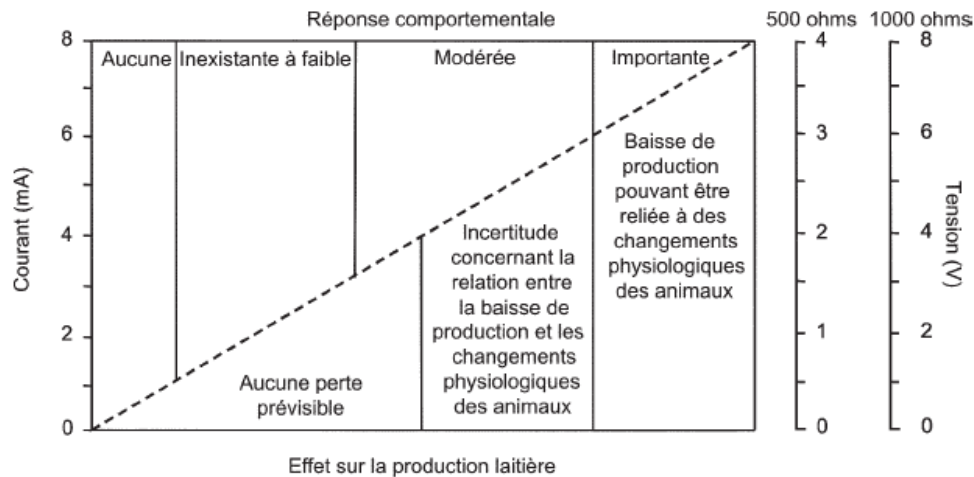
critères physiologiques, zootechniques et sanitaires plus classiquement rencontrés (Veissier *et al* 1999). Au cours des expérimentations menées chez les animaux de rente, les seuils de réponse aux tensions électriques sont donc généralement évalués en étudiant les réponses comportementales et physiologiques des animaux ainsi que les conséquences éventuelles de ces tensions sur des paramètres de production.

2.2 / Réponses comportementales

De nombreuses études ont utilisé une approche comportementale descriptive afin de caractériser la réponse des animaux aux tensions électriques parasites et de déterminer les seuils de réponse aux tensions électriques. Cependant, pour un même trajet emprunté par le courant, les réponses comportementales peuvent être très variées, du simple lever de patte au sursaut, à la crispation et jusqu'au courbement de dos et au coup de patte pour les vaches laitières (Lefcourt *et al* 1986). La difficulté pour les auteurs réside donc dans le choix de critères comportementaux pertinents pour définir le seuil de réponse des animaux aux tensions parasites. Reinemann *et al* (1999b) ont déterminé que l'activité faciale (mouvements de la tête, du museau ou des oreilles...) était le critère comportemental le plus sensible et le plus répétable lorsque l'application d'un courant électrique était réalisée entre le mufle et les sabots, le soulèvement des sabots étant également un bon critère de détermination du seuil de réaction. Les réponses observées en présence de tensions parasites chez les bovins vont d'une réponse comportementale modérée à une réponse comportementale sévère. Lefcourt (1982) définit la «réponse comportementale modérée» par la manifestation de tressaillements de la peau ou de vocalisations auxquelles peuvent s'ajouter, selon les auteurs, des levers intempestifs de pattes ou bien une «danse» d'une patte sur l'autre, de la crispation musculaire et des mouvements soudains de la tête (Gustafson *et al* 1985, Lefcourt *et al* 1986, Brugère 2002). La «réponse comportementale sévère» se traduit par des sauts, des courbements de dos et des coups de pattes (Lefcourt *et al* 1985, 1986, Aneshansley *et al* 1992).

Chez les bovins, il serait possible de réduire les seuils de réponse comportementale observés dans la littérature à deux valeurs : 2 et 6 mA. Ainsi, généralement aucune réponse n'a été

Figure 7. Réponses comportementales et effets sur la production laitière en fonction du courant électrique (axe des ordonnées à gauche) chez la vache laitière. Les tensions (axes des ordonnées à droite) sont estimées en considérant la résistance corporelle de la vache à 500 ohms (conditions défavorables, c'est-à-dire milieu humide, trajet à travers l'animal offrant la plus faible résistance ou faible résistance de contact) et à 1000 ohms (cas le plus fréquent en élevage). Les informations fournies par cette figure correspondent à l'opinion consensuelle d'experts en sciences animales qui ont participé à la plupart des recherches sur les tensions électriques parasites conduites aux Etats-Unis et au Canada (d'après Aneshansley et Gorewit 1991). Cette figure représente les réponses moyennes. Cependant, de par la variabilité individuelle, il est probable que certains individus répondent à des courants ou tensions plus faibles.



observée jusqu'à 2 mA (environ 2 V) chez des vaches laitières (Gustafson *et al* 1985). De 2 à 6 mA (2 à 4 V selon les auteurs), les réponses sont durables et de type «réponses comportementales modérées» (Norell *et al* 1983, Roussel *et al* 2007). Au delà de 6 mA (ou > 4 V selon les auteurs), des «réponses comportementales sévères» peuvent être observées et certains animaux dits «sensibles» manifestent alors des comportements dangereux qui mettent en jeu leur sécurité et celle des expérimentateurs (Lefcourt *et al* 1986). Les chercheurs nord-américains (Etats-Unis et Canada) sont arrivés au consensus de trois valeurs seuils : absence de réponse comportementale jusqu'à 1 mA, une perception du courant de 1 à 3 mA, des réponses comportementales modérées de 3 à 6 mA et des réponses sévères au delà de 6 mA (figure 7, d'après Aneshansley et Gorewit 1991).

Chez des porcs à l'engrais, aucune réponse comportementale n'a été observée jusqu'à 0,25 mA appliqués sur l'abreuvoir. A partir de 3 mA le temps de buvée a été affecté avec, au-delà de 4 mA, une réduction de la quantité d'eau consommée (Gustafson *et al* 1986). Certaines observations en élevage porcin font cependant état de caudophagie chez les animaux soumis à des tensions électriques parasites (Lasseret 2001). Chez le mouton, des réponses

comportementales modérées durables sont observées à partir de 5 V (Duvaux-Ponter *et al* 2005, 2006).

2.3 / Réponses physiologiques

Les réponses physiologiques à un agent stressant mettent en jeu le système nerveux sympathique (libération des catécholamines : adrénaline et noradrénaline) et l'axe corticotrope (libération de cortisol chez les ruminants et les porcins). Les catécholamines agissent sur le système cardiovasculaire en augmentant la fréquence cardiaque. En raison des contraintes expérimentales liées à la mesure directe des catécholamines, le recours à la mesure de la fréquence cardiaque est très fréquent pour évaluer l'état de stress (Hopster et Blokhuis 1994, Veissier *et al* 1999, von Borell *et al* 2007), malgré le fait que les variations de la fréquence cardiaque ne soient pas spécifiques de l'effet des catécholamines. Pour apprécier la réponse de l'axe corticotrope de l'animal en situation de stress, le dosage du cortisol est une mesure courante dans l'évaluation d'un stress aigu (Mormède *et al* 2007).

a) Fréquence cardiaque

L'intensité du courant électrique a un effet sur la fréquence cardiaque. Ainsi, chez la vache laitière, des courants de

3,6 mA, 6 mA, 10 mA et 12,5 mA, appliqués entre la patte antérieure droite et la patte postérieure droite, durant la traite, entraînent respectivement une augmentation de +3, +6, +17 et +30 battements/minute (augmentations relatives de +4%, +8%, +23% et +40%, respectivement) (Lefcourt *et al* 1985, 1986). Par ailleurs, Gorewit et Scott (1986) ont observé une augmentation de +25 battements/minute (augmentation relative de +33%) chez des vaches laitières immédiatement après l'application de 4 mA dans la région lombaire.

b) Endocrinologie (catécholamines et cortisol)

Chez des vaches laitières, les concentrations plasmatiques d'adrénaline et de noradrénaline ne semblent pas affectées par des courants de 2,5 mA et de 12 mA, appliqués entre la patte antérieure droite et la patte postérieure droite (Lefcourt et Akers 1982, Lefcourt *et al* 1986). Chez des génisses laitières, une élévation transitoire de la concentration plasmatique en cortisol par rapport à des animaux témoins a été observée suite à l'application d'une tension électrique de 1 V (environ 1,3 mA) au niveau de la mangeoire mais cette augmentation n'était plus observée pour des tensions supérieures (Rigalma, résultats non publiés). Une augmenta-

tion de la concentration plasmatique en cortisol a également été mise en évidence, chez la vache laitière pour un courant de 8 mA appliqué entre la mamelle et les sabots (Henke Drenkard *et al* 1985), chez la brebis pour un courant de 4 mA appliqué sur la patte antérieure (Przekop *et al* 1985) et chez le porc pour un courant de 2,5 mA appliqué sur la patte arrière (Ziecik *et al* 1993). L'application d'un courant électrique n'entraîne pas une augmentation systématique de la concentration plasmatique en cortisol comme le montrent les résultats de Reinemann *et al* (2003) qui ont appliqué (entre les sabots antérieurs et postérieurs) des courants de 3 à 5,25 mA à des vaches laitières. Cependant, les réponses en cortisol des animaux soumis à des tensions électriques parasites sont à interpréter avec prudence au regard de la sécrétion pulsatile et des rythmes ultra- et circadiens du cortisol (Mormède *et al* 2007).

2.4 / Performances zootechniques et état sanitaire

a) Production laitière

A partir d'observations en élevage, de nombreux auteurs associent une chute de la production laitière à la présence de tensions électriques parasites (Salisbury et Williams 1967, Sanders *et al* 1981, Wilson *et al* 1996). Ainsi, en éliminant des tensions électriques parasites générées par le distributeur automatique de concentrés, Wilson *et al* (1996) ont observé une augmentation de la production laitière.

Cependant, la plupart des études sur les performances laitières en milieu expérimental contrôlé ne montrent pas d'effets des tensions parasites. Ainsi, la quantité de lait produite et sa qualité (taux butyreux et protéique) ne sont pas modifiées chez des vaches laitières soumises à des courants de 1 à 8 mA appliqués au niveau de la colonne vertébrale (Gorewit *et al* 1985, Gorewit et Scott 1986), de la mamelle aux sabots (Henke Drenkard *et al* 1985), entre le sabot postérieur droit et le genou antérieur droit (Lefcourt *et al* 1985), ou entre les sabots antérieurs et postérieurs (Reinemann *et al* 2002). Le temps de traite n'est pas modifié par des courants de 3,6 à 8 mA appliqués de la mamelle aux sabots (Henke Drenkard *et al* 1985) ou entre le sabot postérieur droit et le genou antérieur droit (Lefcourt *et al* 1985).

Néanmoins, Lefcourt et Akers (1982) observent une diminution de la produc-

tion laitière (- 12%) et de la durée de traite (- 51 secondes) suite à l'application aléatoire, lors de la traite, de 5 mA entre la patte antérieure droite et la patte postérieure droite. Ces auteurs n'observent cependant pas de modifications physiologiques concomitantes à la diminution de production laitière (les concentrations plasmatiques en ocytocine et en catécholamines restent inchangées). De plus, à part l'étude de Gorewit *et al* (1992a) réalisée à l'échelle d'une lactation complète et qui n'a montré aucun effet de l'exposition à des tensions comprises entre 1 et 4 V au niveau de l'abreuvoir, les études sont réalisées la plupart du temps sur une échelle de temps réduite (généralement inférieure à 1 semaine).

b) Production de viande

La quantité d'aliment ingérée et le gain moyen quotidien entre les âges de 17 et 21 semaines de porcs soumis à une tension électrique de 5 V (environ 8 mA), appliquée entre la mangeoire ou l'abreuvoir et le sol, ont été moins élevés que ceux des animaux témoins (Robert *et al* 1991). Cependant, ces effets n'ont pas été confirmés par Robert *et al* (1992) et par Godcharles *et al* (1993). Chez le poussin, l'exposition à un courant électrique de 2,9 à 8,7 mA appliqué entre les pattes (au moyen d'un sol grillagé) a entraîné une diminution du gain de poids et de l'ingestion, et une augmentation de l'indice de consommation (McFarlane *et al* 1989).

c) Production d'œufs

Dans un élevage de poules pondeuses soumises à des tensions électriques parasites de 0,8 à 1,5 V au niveau de l'abreuvoir et de la cage, Wilcox et Jordon (1986) ont observé une baisse de la consommation d'aliments et une réduction de la ponte de l'ordre de 30% par rapport aux résultats «normaux» de l'élevage. La réduction de ces tensions électriques parasites à 0,2 V a été accompagnée d'un retour à la normale de la consommation d'aliments et d'eau ainsi que de la ponte, ce qui laisse supposer que les tensions électriques parasites pourraient nuire aux performances de ponte. Cependant, chez la poule pondeuse, une expérimentation menée en milieu contrôlé a montré que des tensions électriques de 1 à 18 V (de 0,0025 mA à 0,045 mA), appliquées entre le bec et les pattes, n'avaient d'effets ni sur la fréquence de ponte hors du nid ni sur la consommation d'eau et de nourriture (Vidali *et al* 1995). De plus, une étude menée dans

quinze élevages de poules pondeuses a montré que la fréquence de ponte hors du nid ne serait pas corrélée à la présence de tensions électriques parasites (de 1 à 21 V selon les élevages) (Worley et Wilson 2001).

d) Reproduction et état sanitaire

Des observations en élevages laitiers semblent montrer que la présence de courants électriques parasites pourrait augmenter l'occurrence de mammites (Churchward 1948, Kirk *et al* 1984, Wilson *et al* 1996). Cependant, aucune étude en milieu contrôlé n'a confirmé cette hypothèse (Henke Drenkard *et al* 1985, Lefcourt *et al* 1985, Gorewit *et al* 1992b, Southwick *et al* 1992). Ainsi, chez des vaches laitières, l'application d'un courant électrique de 1 mA au niveau de l'abreuvoir, durant une lactation complète, n'a eu d'effets ni sur l'incidence des mammites, ni sur l'apparition de boiteries, ni sur les performances de reproduction (Gorewit *et al* 1992b). Les travaux de Reinemann *et al* (1999a) chez la vache laitière ont montré également l'absence d'effets sur la fonction immunitaire (niveaux cellulaire et humoral) d'un courant électrique de 1 mA appliqué entre les sabots antérieurs et postérieurs.

Chez les porcs, les tensions électriques parasites ne semblent pas avoir d'effets sur leur santé. Ainsi, chez des porcs à l'engrais, des tensions électriques de 2 V, 5 V ou 8 V (entre 1,8 mA et 14 mA), appliquées au niveau de la mangeoire ou de l'abreuvoir, n'ont eu aucun effet sur l'apparition de lésions gastriques ou sur le profil métabolique (Robert *et al* 1991, 1992). De plus, la santé de truies en lactation soumises à des tensions de contact (mangeoire et abreuvoir) ou à des tensions de pas (onglons avants-onglons arrières) de 2 V, 5 V ou 8 V (entre 1,8 mA et 14 mA) n'a pas été détériorée de même que les performances de reproduction (Robert *et al* 1996).

En conditions expérimentales, Vidali *et al* (1995) n'ont pas observé de problèmes de santé chez des poules pondeuses soumises à des tensions allant jusqu'à 18 V. Cependant, dans un élevage de dindes, Halvorson *et al* (1989) ont enregistré des taux de mortalité élevés (de 10 à 26%) sur trois bandes successives de dindonneaux. Des tensions électriques parasites de 2,5 V mesurées entre l'abreuvoir et le sol étaient suspectées d'être responsables de cette mortalité. Dans un cadre expérimental (application au niveau de l'abreuvoir de courants supérieurs à 0,5 mA), ces

mêmes auteurs ont enregistré une augmentation de la mortalité précoce entre 0 et 7 jours de vie, à cause d'une déshydratation. Cependant, au cours de cette même expérimentation, il a été montré que le niveau de tension électrique mesuré dans l'élevage pouvait difficilement expliquer les taux de mortalité importants puisqu'une tension de 17,5 V serait nécessaire pour qu'un dinde soit parcouru par un courant de 0,5 mA en considérant une résistance minimale de 35 kilo ohms (figure 4).

2.5 / Facteurs de variation de la réponse des animaux

a) Variabilité individuelle de réponse

Il existe une forte variabilité individuelle de réponse aux tensions électriques parasites intra- et inter-expérimentations. Cette variabilité peut provenir de différentes sources. Tout d'abord, pour une même tension électrique appliquée, des animaux présentant des résistances différentes ne seront pas soumis à la même intensité de courant et n'auront donc pas la même réponse à l'agent stressant. Ainsi, lorsque des porcs sont soumis à

une tension de 2 V au niveau de leur abreuvoir un individu présentant une forte résistance corporelle (1056 Ω , pour le trajet groin-onglons) n'est soumis en moyenne qu'à un courant de 1,8 mA alors qu'un congénère présentant une résistance plus faible (399 Ω , pour le même trajet) est parcouru en moyenne par un courant de 5,2 mA (Valiquette *et al* 1994). Il est possible qu'au sein d'un même lot d'animaux, les individus présentant une résistance corporelle faible expérimentent des courants jusqu'à 3 fois plus forts que les individus présentant une résistance corporelle plus élevée. La figure 8 illustre la variabilité interindividuelle de la résistance observée pour un même trajet chez la vache laitière, à partir des résultats de Norell *et al* (1983).

De plus, de par sa réponse comportementale, l'animal peut également modifier la résistance du point de contact à ces tensions parasites, et faire ainsi varier la quantité de courant le traversant (figure 6). Ainsi, chez des vaches laitières soumises à des tensions électriques au niveau de leur abreuvoir, Reinemann *et al* (2005) ont observé une modification du comportement de

buvée : les animaux ont exercé une pression sur l'abreuvoir de manière à augmenter la surface de contact mufle-abreuvoir et donc diminuer la densité de courant au niveau de leur mufle. De même, chez le porc, Valiquette *et al* (1994) ont observé que certains individus étaient capables d'augmenter leur résistance corporelle totale notamment en modifiant le contact de leur groin avec l'élément électrifié. Ainsi, la capacité de certains individus à adapter leur comportement peut en partie expliquer la variabilité des réponses aux tensions électriques parasites.

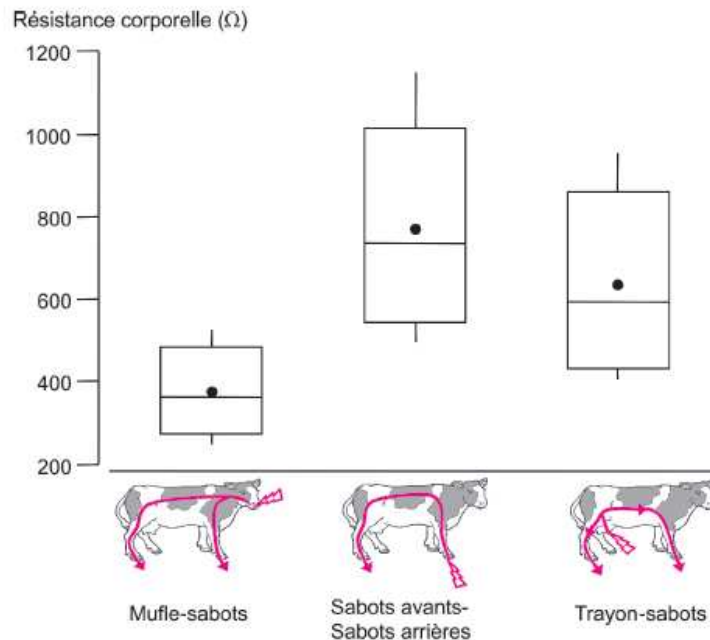
b) Imprévisibilité

En élevage, les tensions électriques parasites sont parfois des phénomènes intermittents, voire aléatoires, ce qui les rend donc imprévisibles et difficiles à diagnostiquer (Deschamps 2002). Or, cette imprévisibilité peut s'avérer perturbante pour l'animal. En effet, les études sur le stress en élevage montrent que la réaction de l'animal est déterminée par la manière dont il se représente l'événement et non par l'événement en tant que tel (Boissy *et al* 2007). Ainsi, la prévisibilité serait un des critères qui permettrait à l'animal d'évaluer une situation (Désiré *et al* 2002) : des moutons soumis à un événement surprenant prévisible ont été moins stressés que les moutons pour lesquels l'événement surprenant était imprévisible (Greiveldinger *et al* 2007). Dans le cas des courants parasites, le caractère aléatoire de leur présence peut introduire une composante « imprévisibilité » qui accentuerait le niveau de stress ressenti par l'animal en comparaison avec un stress vécu de manière prévisible (cas de la présence systématique de tensions électriques). Une expérience menée récemment confirme cette hypothèse. Des génisses laitières exposées de manière imprévisible à une tension électrique de 3,3 V (environ 3,1 mA) au niveau d'une mangeoire n'ont pas adapté leur comportement pour limiter l'exposition à l'agent stressant contrairement aux génisses exposées en permanence à la même tension électrique (Rigalma *et al* 2007).

c) Expérience préalable et habitude

La réponse à un agent stressant est modérée si l'individu a une expérience préalable de cet agent stressant (Lauber *et al* 2006). Ainsi, lors de l'application de 3,3 V au niveau de la mangeoire, la libération de cortisol a été plus importante chez des génisses naïves vis-à-vis de l'électricité que chez des génisses

Figure 8. Distribution de la résistance corporelle (en ohms, Ω) mesurée sur 28 vaches de race Holstein, selon le trajet emprunté par le courant : mufle-sabots, sabots avant-sabots arrières et trayon-sabots (d'après Norell *et al* 1983). L'étendue interquartile (\square), la médiane (—), la moyenne (•) et l'intervalle de confiance (|) sont représentés.



ayant une expérience préalable de celle-ci (Rigalma *et al* 2007). L'expérience préalable de l'électricité pourrait donc moduler la réponse des animaux et diminuer ses effets négatifs lorsque la tension électrique est à nouveau appliquée.

Après les manifestations initiales de stress aigu, consécutives à l'exposition à un agent stressant, les animaux sont souvent capables de s'habituer à cet agent stressant (Friend 1991). Pour Bouissou (1992), l'habituation intervient à la suite de la répétition d'un stimulus et est dépendante de la possibilité de contrôle de l'agent stressant (stimulus) et de son pouvoir aversif. Dans le cadre des études sur les tensions électriques, plusieurs auteurs (Gorewit *et al* 1985, Henke Drenkard *et al* 1985, McFarlane *et al* 1989, Zieci *et al* 1993, Rigalma *et al* 2007) rapportent que les animaux (bovins, porcins, volailles) s'habituent à l'électricité. Ainsi, après avoir observé de fortes réponses comportementales (courbure du dos, déplacements latéraux ou coups de patte) lors de l'application initiale de 4 mA au niveau de la colonne vertébrale, Gorewit *et al* (1985) montrent qu'après 24 h les vaches laitières s'habituent au courant électrique, pour ne présenter quasiment plus de réponses comportementales en fin d'expérimentation (16 j). Cependant, l'habituation aux tensions électriques parasites n'est pas systématique. Ainsi, certaines vaches doivent être retirées des expérimentations car elles ne s'habituent pas à l'électricité (Gorewit *et al* 1989, 1992a). Ces observations montrent que, bien que la majorité des individus semblent s'habituer aux tensions parasites, quelques individus, plus sensibles n'y parviendraient pas.

d) Présence d'autres agents stressants

La présence simultanée de plusieurs agents stressants peut avoir des consé-

quences négatives sur le comportement et les performances zootechniques. Ainsi, chez le porc à l'engrais, la présence simultanée de tensions électriques parasites et d'une restriction alimentaire a entraîné une modification du comportement alimentaire et de buvée accompagnée d'une augmentation des comportements agressifs (coups de tête aux congénères) et d'une diminution du temps de repos alors que ces effets n'étaient pas observés lorsque les tensions électriques parasites étaient appliquées seules, sans autres agents stressants (Robert *et al* 1991, 1992). Cependant, chez le poussin, les performances de croissance sont diminuées de façon similaire lorsque les courants électriques (de 2,9 à 8,7 mA) sont appliqués seuls ou en association avec un autre agent stressant tel que la manipulation, un environnement bruyant, une infestation expérimentale par des coccidies, une forte teneur en ammoniac ou un stress thermique (McFarlane *et al* 1989). Il est possible qu'en élevage les tensions électriques parasites jouent le rôle de facteur aggravant et déclencheur, chez un animal placé dans des conditions non optimales : l'animal ne peut ainsi plus supporter davantage de stress.

Conclusion

Même si la présence de tensions électriques parasites en élevage est une réalité, le diagnostic de problèmes liés à ces tensions reste cependant complexe à réaliser car étroitement lié aux conditions d'élevage, à l'imprévisibilité et à la nature du signal électrique.

La variabilité des réponses des individus au courant électrique parasite justifie l'utilisation d'une approche multicritère afin d'évaluer les effets des courants électriques parasites sur les

animaux de rente. Cette approche combine en effet des critères comportementaux, physiologiques, zootechniques et sanitaires qui, s'ils étaient seuls pris en compte, ne seraient pas spécifiques de l'effet des courants, mais qui, combinés, pourraient mettre en évidence la présence d'un problème au sein de l'élevage.

En élevage, une modification du comportement, une détérioration de l'état sanitaire ou une réduction de la production du troupeau mettent parfois en cause les tensions électriques parasites. Cependant, les résultats des expérimentations menées en milieu contrôlé ne confirment qu'une partie de ces observations. En effet, les expérimentations ne montrent que très peu d'effets des tensions électriques parasites sur les performances de production et sur la santé des animaux de rente. Néanmoins, des modifications du comportement plus ou moins durables et plus ou moins sévères en fonction de l'intensité du courant électrique appliqué et du mode d'application sont enregistrées.

Les réponses physiologiques obtenues au cours des expérimentations semblent indiquer que l'exposition à des tensions élevées entraîne un «stress aigu». L'éventualité d'un stress chronique n'a pas été testée et l'étude de ce type de stress est à envisager. Même si la majorité des animaux s'habituent à l'exposition aux tensions électriques parasites faibles, certains individus plus «sensibles» présentent des réponses comportementales et/ou physiologiques importantes à des niveaux de tension inférieurs au seuil de réaction moyen de l'espèce considérée. Il est probable qu'en élevage la présence de tensions électriques parasites constitue, pour ces individus «sensibles», un facteur de stress important.

Références

- AFNOR, 1956. NF C15-100. Article 322-2.
- Aneshansley D.J., Gorewit R.C., 1991. Physiological and behavioral effects. In : Effects of electrical voltage/current on farm animals. How to detect and remedy problems. Lefcourt A.M. (Ed), Agriculture Handbook, 696 (3), 1-23.
- Aneshansley D.J., Gorewit R.C., Price L.R., 1992. Cow sensitivity to electricity during milking. *J. Dairy Sci.*, 75, 2733-2741.
- Beguén E., Bonnet J., Dolle J.B., Charroin T., Ferrand M., 2008. Les différents postes de consommation en énergie et les pistes d'économie en élevage bovin laitier. *Renc. Rech. Rum.*, 15, 217.
- Blatin D., Benetière J.J., 1998. Influence sur les élevages des champs électromagnétiques induits par les lignes électriques à haute tension. Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, France, 48p.
- Boissy A., Amoult C., Chaillou E., Colson V., Desire L., Duvaux-Ponter C., Greiveldinger L., Leterrier C., Richard S., Roussel S., Saint-Dizier H., Meunier-Salaün M.C., Valance D., 2007. Emotions and cognition : stratégie pour répondre à la question de la sensibilité des animaux. *INRA Prod. Anim.*, 20, 17-21.
- Bouissou M.F., 1992. La relation Homme-Animal. Conséquences et possibilités d'amélioration. *INRA Prod. Anim.*, 5, 303-318.
- Bourget M., Brugère H., Gallouin F., Lemeray P., Picou P., Vaugé C., EDF, 2000. Mieux connaître les risques des courants électriques parasites dans les exploitations d'élevage. Plaquette préparée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, EDF-RTE, PROMOTELEC, l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture et GROUPEAMA, Publicum (Ed), Paris-La Défense, France.
- Brugère H., 1993. La sensibilité des bovins aux tensions parasites. *Bull. Soc. Vét. Prat. Fr.*, 77, 183-191.
- Brugère H., 2002. Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage. *Bull. Soc. Vét. Prat. Fr.*, 86, 182-196.

- Brugère H., 2006. Phénomènes électriques et magnétiques en élevage : mythe ou réalité ? Journ. Nat. Groupements Techniques Vétérinaires, Dijon, France, 435-455.
- Churchward R.E., 1948. A note on the occurrence of electric shocks from milking machines and their possible effect on development of mastitis. *Austr. Vet. J.*, 24, 150.
- Craine L.B., 1975. Effects on mammals of grounded neutral voltages from distribution power lines. *Inst. Elec. Eng.*, 75-303-3-IA.
- Deschamps F., 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bull. Soc. Vét. Prat. Fr.*, 86, 174-181.
- Désiré L., Boissy A., Veissier I., 2002. Emotions in farm animals: a new approach to animal welfare in applied ethology. *Behav. Proc.*, 60, 165-180.
- Duvaux-Ponter C., Roussel S., Deschamps F., 2005. Determination of a stray voltage threshold leading to aversion in sheep. *Proc. 39th Int. Congr. Int. Soc. Applied Ethol.*, Août 2005, Sagamiyara, Japon, 130.
- Duvaux-Ponter C., Roussel S., Ennifer M., Fortin F., Louyot T., 2006. It is easier to define the aversiveness threshold of stray voltage when animals are allowed to avoid it. *Proc. 40th Int. Congr. Int. Soc. Applied Ethol.*, Bristol, Royaume-Uni, 221.
- Friend T.H., 1991. Behavioral aspects of stress. *J. Dairy Sci.*, 74, 292-303.
- Galan F., Dolle J.B., Charroin T., Ferrand M., Hiet C., 2007. Consommation d'énergie en élevage bovin - Des repères pour se situer et progresser. *Renc. Rech. Rum.*, 14, 29-32.
- Gallouin F., 2002. Le Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique (GPSE) dans les élevages agricoles et aquacoles, après deux ans de fonctionnement. *Bull. Soc. Vét. Prat. Fr.*, 86, 197-204.
- Gallouin F., 2009. Expertise scientifique et concertation pour les élevages agricoles. *Sciences et Pseudo Sciences*, 285, 54-56.
- Geddes L.A., Baker L.E., 1967. The specific resistance of biological material - a compendium of data for the biomedical engineer and physiologist. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 5, 271-293.
- Godcharles L., Robert S., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1993. Transient stray voltage: is it detrimental to growth performance, health status and welfare of market pigs? *Vet. Res. Commun.*, 17, 41-53.
- Gorewit R.C., Scott N.R., 1986. Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *J. Dairy Sci.*, 69, 1122-1127.
- Gorewit R.C., Scott N.R., Czarniecki C.S., 1985. Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *J. Dairy Sci.*, 68, 718-725.
- Gorewit R.C., Aneshansley D.J., Ludington D.C., Pellerin R.A., Zhao X., 1989. AC voltages on water bowls: effects on lactating Holsteins. *J. Dairy Sci.*, 72, 2184-2192.
- Gorewit R.C., Aneshansley D.J., Price L.R., 1992a. Effects of voltages on cows over a complete lactation. 1. Milk yield and composition. *J. Dairy Sci.*, 75, 2719-2725.
- Gorewit R.C., Aneshansley D.J., Price L.R., 1992b. Effects of voltages on cows over a complete lactation. 2. Health and reproduction. *J. Dairy Sci.*, 75, 2726-2732.
- Greiveldinger L., Veissier I., Boissy A., 2007. Emotional experience in sheep: Predictability of a sudden event lowers subsequent emotional responses. *Physiol. Behav.*, 92, 675-683.
- Gustafson R.J., Brennan T.M., Appleman R.D., 1985. Behavioral studies of dairy cows sensitivity to AC and DC electric currents. *Trans. ASAE*, 28, 1680-1685.
- Gustafson R.J., Appleman R.D., Brennan T.M., 1986. Electrical current sensitivity of growing/finishing swine for drinking. *Trans. ASAE*, 29, 592-596, 600.
- Halvorson D.A., Noll S.L., Bergeland M.E., Cloud H.A., Pursley R., 1989. The effects of stray voltage on turkey poults. *Avian Dis.*, 33, 582-585.
- Henke Drankard D.V., Gorewit R.C., Scott N.R., Sagi R., 1985. Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *J. Dairy Sci.*, 68, 2694-2702.
- Hopster H., Blokhuis H.J., 1994. Validation of a heart-rate monitor for measuring a stress response in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.*, 74, 465-474.
- Hultgren J., 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet. Res. Commun.*, 14, 287-298.
- Hydro-Québec, 2005. Guide Pratique. Les tensions parasites à la ferme, page consultée en septembre 2009, http://www.hydroquebec.com/publications/fr/autres/pdf/tension_parasite.pdf
- INRS, 2007. Introduction au risque électrique. Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, février 2007, http://www.inrs.fr/htm/introduction_au_risque_electrique.html#references
- Jussiau R., Montméas L., Parot J.C., 1999. L'élevage en France 10 000 ans d'histoire. Educagri éditions (Ed), Dijon France, 550p.
- Kirk J.H., Reese N.D., Bartlett P.C., 1984. Stray voltage on Michigan dairy farms. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 185, 426-428.
- Lasseret V., 2001. Courants parasites électriques. A surveiller...sans s'alarmer ! Jeunes Agriculteurs, 558.
- Lauber M.C.Y., Hemsworth P.H., Barnett J.L., 2006. The effects of age and experience on behavioural development in dairy calves. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 99, 41-52.
- Lefcourt A.M., 1982. Behavioral responses of dairy cows subjected to controlled voltages. *J. Dairy Sci.*, 65, 672-674.
- Lefcourt A.M., 1991. Effects of electrical voltage/current on farm animals: How to detect and remedy problems. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook, 696, 142p.
- Lefcourt A.M., Akers R.M., 1982. Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *J. Dairy Sci.*, 65, 2125-2130.
- Lefcourt A.M., Akers R.M., Miller R.H., Weinland B., 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *J. Dairy Sci.*, 68, 391-401.
- Lefcourt A.M., Kahl S., Akers R.M., 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *J. Dairy Sci.*, 69, 833-842.
- Matte J.J., Robert S., Godcharles L., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1992. Factors affecting the electrical impedance of growing-finishing pigs. *Can. Agric. Eng.*, 34, 189-194.
- McFarlane J.M., Curtis S.E., Shanks R.D., Carner S.G., 1989. Multiple concurrent stressors in chicks. 1. Effect on weight gain, feed intake, and behavior. *Poult. Sci.*, 68, 501-509.
- Mormède P., Andanson S., Aupein B., Beerda B., Guemene D., Malmkvist J., Manteca X., Manteuffel G., Prunet P., Reenen C.G.v., Richard S., Veissier I., 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol. Behav.*, 92, 317-339.
- Norell R.J., Gustafson R.J., Appleman R.D., Overmier J.B., 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. ASAE*, 26, 1506-1511.
- Przekop F., Stupnicka E., Wolinska-Witort E., Mateusiak K., Sadowski B., Domanski E., 1985. Changes in circadian rhythm and suppression of the plasma cortisol level after prolonged stress in the sheep. *Acta Endocrinol.*, 110, 540-545.
- Reinemann D.J., Sheffield L.G., LeMire S.D., Rasmussen M.D., Wiltbank M.C., 1999a. Dairy cow response to electrical environment - final report - part III. Immune function response to low-level electrical current exposure Report to the Minnesota Public Utilities Commission, June, 30 1999, 19p.
- Reinemann D.J., Stetson L.E., Reilly J.P., Laughlin N.K., 1999b. Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Trans. ASAE*, 42, 215-222.
- Reinemann D.J., Rasmussen M.D., LeMire S.D., 2002. Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Trans. ASAE*, 45, 833-838.
- Reinemann D.J., Wiltbank M.C., Rasmussen M.D., Sheffield L.G., LeMire S.D., 2003. Comparison of behavioral to physiological response of cows exposed to electric shock. *Trans. ASAE*, 46, 507-512.
- Reinemann D.J., Stetson L.E., Laughlin N.E., LeMire S.D., 2005. Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Trans. ASAE*, 48, 385-392.
- Rigalma K., Roussel S., Oliveira A., Louyot T., Duvaux-Ponter C., 2007. Détermination du seuil de réaction aux tensions électriques parasites, influence de la prévisibilité et de l'expérience sur les réponses comportementales et physiologiques de génisses Holstein. *Renc. Rech. Rum.*, 14, 314.
- Robert S., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1991. Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Can. J. Vet. Res.*, 55, 371-376.
- Robert S., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1992. Stray voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Can. J. Anim. Sci.*, 72, 467-475.
- Robert S., Godcharles L., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1993. Les tensions parasites chez le porc d'engraissement. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, Paris, France, 25, 83-90.
- Robert S., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1994a. Stray voltage: effects of voltage frequency, floor materials and wetness on electric currents through swine. *Can. Agric. Eng.*, 36, 37-43.

- Robert S., Matte J.J., Bertin-Mahieux J., Martineau G.P., 1994b. Sensitivity of sows, weaned piglets and fattening pigs to stray voltage: some factors of variation. In : ASAE International Winter Meeting, ASAE (Ed), Atlanta, Georgia, USA, 14p.
- Robert S., Matte J.J., Martineau G.P., 1996. Sensitivity of reproducing sows and suckling pigs to stray voltage. *Am. J. Vet. Res.*, 57, 1245-1249.
- Rodenburg J., 1998. Stray voltage problems in livestock production, page consultée en avril 2007, <http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/strayvol.htm>
- Roussel S., Rigalma K., Oliveira A., Louyot T., Duvaux-Ponter C., 2007. Determination of a stray voltage threshold using behavioural measurements in Holstein heifers. *Proc. 41st Int. Cong. Int. Soc. Applied Ethol.*, Merida, Mexico, 232.
- Salisbury R.M., Williams F.M., 1967. The effect on herd production of free electricity on a milking plant. *N. Z. Vet. J.*, 15 206-210.
- Sanders D.E., Sanders J.A., Sangenaro J., 1981. Low milk production associated with transient environmental voltage. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 179, 69.
- Southwick, L.H., Wilson, D.J., and Sears, P.M., 1992. Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one or two volts of alternating current. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 201, 441-444.
- Valiquette S., Bergeron R., Geoffroy J.L., Martineau G.P., Robert S., Matte J.J., 1994. Current and impedance in fattening pigs: effects of biological and environmental parameters. In: ASAE International Winter Meeting, ASAE (Ed), Atlanta, Georgia, USA, 10p.
- Veissier I., Saignac C., Capdeville J., 1999. Les méthodes d'appréciation du bien-être des animaux d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 12, 113-121.
- Vidali G., Silversides F.G., Boily R., Villeneuve P., 1995. Effets des tensions sinusoïdales normales et des trains d'impulsions sur le comportement et la production des poules pondeuses. *Can. J. Anim. Sci.*, 75, 291-296.
- von Borell E., Langbein J., Despres G., Hansen S., Leterrier C., Marchant-Forde J., Marchant-Forde R., Minero M., Mohr E., Prunier A., Valance D., Veissier I., 2007. Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals - a review. *Physiol. Behav.*, 92, 293-316.
- Whittlestone W.G., Mulford M.M., Kigour R., Cate L.R., 1975. Electric shocks during machine milking. *N. Z. Vet. J.*, 23, 105-108.
- Wilcox G.C., Jordan H.C., 1986. Stray voltage affects performance of cage layers: a field observation. *Poult. Sci.*, 65 suppl., 144.
- Wilson D.J., Southwick L.H., Kaeser D.R., 1996. Improvement in milk production and udder health following correction of stray voltage on computer feeders. *Agri Practice*, 17, 24-29.
- Worley J.W., Wilson J.L., 2001. Analysis of stray voltage on broiler breeder farms. *J. Appl. Poultry Res.*, 10, 394-403.
- Ziecik A.J., España F., Garcia Casado P., 1993. Effect of electrical stress stimuli on luteinizing hormone, prolactin and cortisol secretion in pigs. *Invest. Agric. Prod. Sanid. Anim.*, 8, 269-280.

Résumé

L'élevage des animaux de rente implique une utilisation croissante d'équipements électriques et électroniques ainsi que le recours à du matériel et à des structures métalliques qui sont autant de facteurs favorisant l'apparition des courants électriques parasites. Les tensions à l'origine de ces courants, généralement inférieures à 10 volts, sont dues principalement à un défaut de mise à la terre et à une mauvaise équipotentialité des masses métalliques. Les animaux, en raison d'une faible résistance électrique, sont sensibles à ces faibles tensions électriques. Le contact direct du nez (muffle, groin) et des pattes avec le milieu humide diminue leur résistance au courant électrique alors que, chez l'homme, le port d'équipements de protection comme les bottes en caoutchouc augmente cette résistance.

En élevage, les tensions électriques parasites sont parfois mises en cause lorsque des modifications comportementales, une dégradation de l'état sanitaire ou des baisses de production sont observées chez les animaux. Cependant, les expérimentations menées en milieu contrôlé montrent rarement un effet direct des tensions électriques parasites sur les paramètres zootechniques bien que des modifications comportementales et physiologiques, probablement liées à la présence d'un stress, soient parfois mises en évidence.

La grande variabilité de réponse des animaux et le caractère imprévisible des tensions électriques parasites expliquent les difficultés à les diagnostiquer et à caractériser leurs effets sur les animaux en élevage.

Abstract

Stray voltage in farm animals

Modern farming techniques involve an increasing use of electrical and electronic equipment together with metallic features which can be responsible for stray-voltage. Stray-voltage, less than 10 volts, is often due to a faulty connection between the electrical circuit and the earth. Animals, due to a lower electrical resistance than humans, are more sensitive to these low voltages. Moreover, direct contact of the muzzle and hooves with often wet surroundings reduces their resistance to electric current, whereas in man, the fact of wearing protective gloves and rubber boots increases this resistance.

In farms, when animal behaviour modifications, deterioration of health status or reductions in production are observed, stray-voltage is sometimes implicated. However, experiments conducted under controlled conditions rarely show the effects of stray-voltage on production parameters. Nevertheless, some behavioural and physiological changes, probably related to the presence of stress, are often observed.

The unpredictability of stray-voltage and the great variability in the response to stray-voltage exposure make diagnosis and characterisation of its effects in farm animals difficult.

RIGALMA K., DUVAUX-PONTER C., GALLOUIN F., ROUSSEL S., 2009. Les courants électriques parasites en élevage. *Inra Prod. Anim.*, 22, 291-302.

2. Problématique générale de la thèse

2.1. Objectifs de la thèse

Cette thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche) est le fruit de la collaboration entre, d'une part, l'équipe Bien-être Animal et Comportement de l'Unité de Formation et de Recherches (UFR) Nutrition animale, qualité des produits et bien-être qui fait partie du Département Sciences de la Vie et Santé d'AgroParisTech et, d'autre part, le gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE).

Le **premier objectif** a consisté à **déterminer le seuil de réaction aux tensions électriques de génisses** en prenant en compte le comportement et la physiologie du stress à court terme (chapitre 3 partie 1).

La synthèse de la littérature présentée dans le premier chapitre de cette thèse a permis de faire un point sur l'état des connaissances concernant les courants électriques parasites en élevage et par la même occasion de positionner le présent travail de recherche par rapport aux travaux déjà réalisés principalement chez la vache laitière et le porc. La très grande majorité des études effectuées chez la vache laitière a porté sur un faible nombre d'animaux avec des durées d'exposition à la tension ou au courant électrique très courtes, généralement de l'ordre de la semaine. De plus, les courants électriques étaient souvent appliqués au moyen d'électrodes, qui ont l'avantage de réduire la résistance du point de contact et par conséquent la variabilité de l'intensité du courant traversant l'animal, mais l'inconvénient de s'éloigner des conditions d'élevage. Le **deuxième objectif** de cette thèse a donc été de se placer dans les conditions d'élevage et d'**exposer à moyen terme des vaches laitières en production à des tensions électriques** (chapitre 3 parties 2 et 3). L'originalité de ce travail a résidé dans la diversité et la complémentarité des mesures réalisées mettant en jeu des critères comportementaux, physiologiques et zootechniques pour apprécier les conséquences des tensions électriques. En plus de l'évaluation de la présence éventuelle d'un stress aigu suite à l'exposition aux tensions électriques, ce travail a également permis d'évaluer la présence éventuelle d'un stress chronique, avec notamment un fort accent mis sur l'étude comportementale.

Alors que de nombreuses publications concernent la vache laitière et le porc, les effets des tensions électriques n'ont pas été étudiés chez les ovins. C'est pourquoi, le **troisième objectif** a été d'**évaluer, dans des conditions d'élevage, les effets à moyen terme des tensions électriques sur le comportement et la physiologie du stress** chez des agnelles destinées au renouvellement (chapitre 2 partie 2 et annexe 2) ainsi que **sur la physiologie du stress et les performances de production** chez des agneaux de boucherie (chapitre 2 partie 1).

Les tensions électriques parasites en élevage étant le plus souvent des phénomènes aléatoires et donc imprévisibles, le **quatrième objectif** de ce travail a été d'**étudier les conséquences**

de l'imprévisibilité des tensions électriques sur les réponses comportementales, physiologiques et zootechniques des animaux (chapitres 2 et 3).

2.2. Stress

2.2.1. Définitions du stress

Chez les êtres vivants supérieurs, les perturbations internes engendrées par les modifications de l'environnement sont en général maintenues dans des limites étroites selon le principe d'homéostasie (Cannon 1932). Ainsi, quand un animal est confronté à une situation menaçante, des réponses au niveau comportemental, neuroendocrinien, physiologique et métabolique se mettent en place. Ces réactions se traduisent par la réaction d'alarme décrite par Cannon (1935) et par le « syndrome général d'adaptation » décrit par Selye (1976).

Lorsqu'un individu est confronté à un danger (un chat entendant l'abolement d'un chien dans les expériences de Cannon), son système catécholaminergique rentre en jeu. La médullo-surrénale et les terminaisons nerveuses sympathiques libèrent immédiatement de l'adrénaline et de la noradrénaline. Les catécholamines provoquent une augmentation de la fréquence et de la force des contractions cardiaques, une contraction de la rate qui libère alors davantage de globules rouges, une augmentation de la glycogénolyse et des variations du diamètre des vaisseaux sanguins afin d'assurer une redistribution du sang de la peau et des viscères vers le cerveau et les muscles (Dantzer et Mormède 1979).

Le syndrome général d'adaptation décrit par Selye (1976) se caractérise par l'activation de l'axe corticotrope, aboutissant à la synthèse de glucocorticoïdes par le cortex surrénalien. Ce syndrome se déroule en trois phases : une phase d'alarme durant laquelle les glucocorticoïdes sont libérés afin de compléter et prolonger l'effet des catécholamines, une phase de résistance pendant laquelle l'animal s'adapte à l'environnement en trouvant un nouvel équilibre et une phase d'épuisement qui peut conduire à la mort de l'individu si aucun équilibre ne s'installe. Sous l'action de stimulations de l'environnement, les neurones du noyau paraventriculaire de l'hypothalamus libèrent de la corticolibérine (CRH). La corticolibérine stimule l'hypophyse qui libère l'hormone adrénocorticotrope (ACTH) dans la circulation générale. L'ACTH agit sur le cortex surrénalien en stimulant la synthèse et la libération des glucocorticoïdes, notamment le cortisol chez les mammifères d'élevage (Broom et Johnson 1993). Le cortisol libéré agit, par une boucle de rétroaction négative, sur l'hypothalamus et l'hypophyse pour inhiber la sécrétion de CRH et d'ACTH (Mormède 1995) (figure 1). Le cortisol agit à de nombreux niveaux : sur le système cardiovasculaire, le système immunitaire, le métabolisme énergétique, la reproduction... (revue de Sapolsky *et al.* 2000).

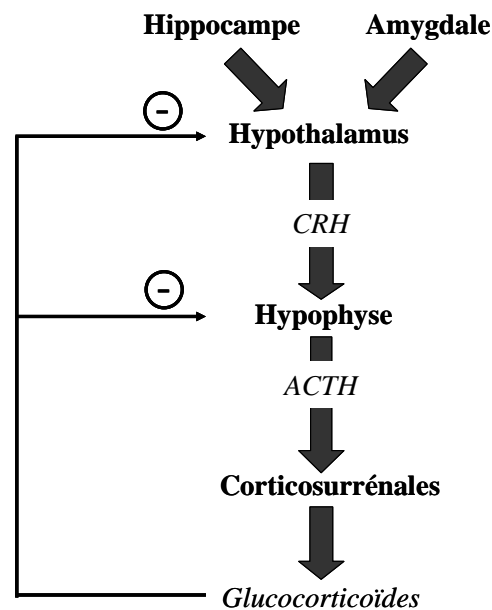


Figure 1. Organisation de l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, encore appelé axe corticotrope ou axe HPA.

Des interactions existent entre le système catécholaminergique et l'axe corticotrope. En effet, les catécholamines stimulent la production de glucocorticoïdes. La dénervation des glandes surrénales réduit la libération de glucocorticoïdes après stimulation avec de l'ACTH exogène alors que des stimulations électriques des nerfs au niveau des surrénales stimulent la libération de glucocorticoïdes (Edwards et Jones 1993). Réciproquement, les glucocorticoïdes stimulent l'activité de la phényléthanolamine N-méthyl transférase (PNMT), enzyme qui catalyse la N-méthylation de la noradrénaline pour former l'adrénaline (Wurtman et Axelrod 1966) (figure 2). L'activation du système catécholaminergique et de l'axe corticotrope a été souvent décrite et étudiée en présence d'un agent stressant. Cependant d'autres systèmes neurohormonaux sont également impliqués dans les réponses de stress. Les hormones sexuelles, certains neuropeptides comme la prolactine (Touraine et Goffin 2005), l'ocytocine (Kramer *et al.* 2003), la vasopressine (Huber *et al.* 2005), la sérotonine (Chaouloff *et al.* 1999) et les β -endorphines (Iny *et al.* 1987) peuvent être libérés quand un animal est confronté à un agent stressant.

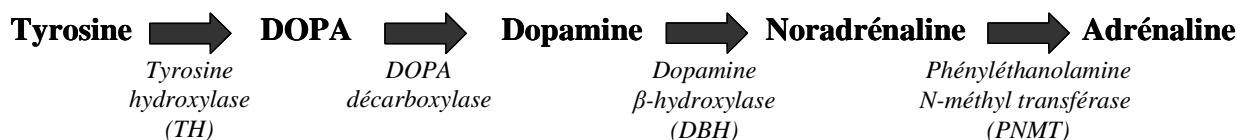


Figure 2. Biosynthèse des catécholamines à partir de la tyrosine.

L'utilisation du terme *stress* entraîne un problème de sémantique. En effet, certains auteurs l'emploient pour décrire les causes (*ex.* stress nutritionnel, stress thermique...) tandis que d'autres l'utilisent pour désigner les réponses de l'organisme (Zayan 1990, Ewbank 1992). Dans cette thèse, le terme *stress* décrira la réponse de l'organisme aux facteurs d'agression physiologiques et psychologiques alors que l'expression *agent stressant* (ou *stressor* en anglais) désignera la cause, c'est-à-dire le facteur d'agression.

2.2.2. *Stress aigu et stress chronique*

Il est possible de distinguer deux formes de stress : le stress aigu et le stress chronique.

Le stress aigu est lié à des agents stressants ponctuels susceptibles d'agir sur l'individu, il s'agit d'une réponse de courte durée. Dans une situation de stress aigu due, par exemple, à une contention ou à un transport de quelques heures, l'animal répond par une forte activation neuroendocrinienne. Des catécholamines sont libérées en quelques secondes par les terminaisons du système nerveux sympathique et par les médullo-surrénales. L'activation de l'axe corticotrope conduit à la libération d'ACTH, de vasopressine et de glucocorticoïdes. Le retour à un état d'équilibre (ou état de base) s'effectue dans un laps de temps de plusieurs dizaines de minutes (revue de Mormède *et al.* 2007).

Le stress chronique peut provenir d'une exposition prolongée à un agent stressant. Cependant, une exposition répétée à un agent stressant ponctuel entraîne également un stress chronique. En situation de stress chronique, la sensibilité aux glucocorticoïdes de zones du système nerveux central contrôlant l'activité hypothalamique comme l'amygdale et l'hippocampe peut être altérée à très long terme (Kanitz *et al.* 2004). Cela conduit à une modification de l'équilibre de l'activité de l'axe corticotrope et en particulier à des niveaux de base de cortisol élevés. Par exemple, les concentrations plasmatiques basales de cortisol sont augmentées pendant plusieurs semaines lorsque les truies sont maintenues à l'attache (Janssens *et al.* 1995).

Les réponses de stress aigu et de stress chronique se produisent sur deux échelles de temps différentes (minutes *vs.* semaines), ce qui nécessite des mesures spécifiques afin d'évaluer les réponses de l'animal. Différents indicateurs comportementaux, physiologiques, sanitaires et zootechniques sont utilisés pour apprécier le stress aigu et le stress chronique chez les animaux d'élevage et sont présentés dans le tableau 1. Parmi les indicateurs physiologiques, le cortisol est à considérer avec précaution. En effet, sa sécrétion est pulsatile (périodicité d'environ 90 minutes) et présente de plus un rythme circadien génétiquement déterminé et synchronisé par la lumière, avec un pic de sécrétion vers la fin de la période d'obscurité et un creux durant la soirée et la nuit chez les animaux diurnes (la plupart des animaux d'élevage). L'axe corticotrope est également sensible aux changements environnementaux tels que la température, l'humidité et l'alimentation (revue de Mormède *et al.* 2007).

Tableau 1. Exemples d'indicateurs utilisés dans l'évaluation des réponses de stress aigu et de stress chronique chez les animaux d'élevage. Les indicateurs utilisés au cours de cette thèse sont en caractères gras.

	Type de réponse	
	Stress aigu	Stress chronique
Indicateurs comportementaux	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Réactivité comportementale (vocalisations, mouvements brusques, agressivité, fuite...) 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Réactivité comportementale (apathie ou hyper-réactivité) ♦ Rythme d'activité (budget-temps) ♦ Activités redirigées, activités à vide et stéréotypies
Indicateurs physiologiques	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Concentration en catécholamines (plasma) et en cortisol (plasma ou lait) ♦ Fréquence cardiaque et/ou variabilité de la fréquence cardiaque ♦ Pression artérielle 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Concentration en catécholamines (plasma) et en cortisol (plasma ou lait^a) ♦ Activité des enzymes de synthèse des catécholamines (TH et PNMT) ♦ Réactivité de l'axe corticotrope (test à l'ACTH^b, au CRH)
Indicateurs immunitaires	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Profil lymphocytaire et production de cytokines 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Réponse immunitaire (du processus inflammatoire jusqu'à l'immunité acquise)
Indicateurs zootechniques		<ul style="list-style-type: none"> ♦ Croissance ♦ Performances de reproduction ♦ Production laitière ♦ Qualité du lait

^a peut être utilisé comme indicateur de stress chronique, mais reste difficile à interpréter avec peu de prélèvements. ^b validé comme indicateur de stress chronique chez les bovins, non validé actuellement chez les ovins.

2.2.3. *Représentation de l'environnement*

Les travaux de Selye (1973, 1976) ont défini la notion de « stress » comme la réponse non spécifique de l'organisme aux diverses sollicitations de l'environnement. Cependant, la réponse des individus à leur environnement dépend de la façon dont ils perçoivent la situation déclenchante. Ainsi, Mason (1971) a montré que des singes privés de nourriture présentaient des taux élevés de métabolites des glucocorticoïdes dans leurs urines (signe de stress) lorsqu'ils assistaient à la distribution d'aliments à d'autres singes. Par contre, si ces singes privés de nourriture recevaient un substitut alimentaire non nutritif pendant que leurs voisins recevaient de l'aliment, ou s'ils n'assistaient pas à la distribution, leur taux de métabolites des glucocorticoïdes n'augmentait pas. L'absence d'aliment n'était donc pas le facteur responsable de la réponse, mais c'était la perception d'une privation par rapport aux congénères qui en était responsable.

Par ailleurs, Veissier et Boissy (2007) insistent sur le fait que les réponses de stress et le bien-être des animaux dépendent de la manière dont ceux-ci perçoivent leur environnement, et que, par conséquent, l'animal possède un certain degré de capacité cognitive. La nature des réponses des animaux dépend de cette évaluation cognitive de l'environnement. Nous avons abordé cet aspect dans le cadre d'une expérimentation portant sur la manière dont les ovins (agnelles) se représentaient un lieu potentiellement chargé négativement sur le plan émotionnel (chapitre 2 partie 2).

2.2.4. *Rôle de la prévisibilité et contrôlabilité*

La prévisibilité d'un événement est connue pour moduler la réponse d'un animal à cet événement (Weinberg et Levine 1980). L'imprévisibilité d'un agent stressant modifie le comportement (*ex.* sursaut, agressivité) et la physiologie du stress, et peut entraîner un stress chronique (*ex.* augmentation de la concentration plasmatique en cortisol) chez le rat (revue de Bassett et Buchanan-Smith 2007). De plus, chez le porc, l'imprévisibilité de contacts répétés positifs ou négatifs avec l'homme entraîne un stress chronique (augmentation de la concentration plasmatique en cortisol) et une modification durable de la réactivité à l'homme (Hemsworth *et al.* 1987). De même, des changements dans la prévisibilité d'événements positifs comme l'alimentation peuvent affecter le bien-être. Ainsi, des porcs qui reçoivent leur ration de manière imprévisible manifestent plus de comportements agonistiques (compétition à l'auge et agression entre congénères) que lorsque la distribution de l'alimentation est réalisée de manière prévisible (Carlstead 1986). Deux types distincts de prévisibilité peuvent coexister, ceux-ci pouvant néanmoins se superposer. La « prévisibilité temporelle » qui est décrite par le fait que les événements se produisent à intervalles fixes alors que la « prévisibilité associative » se caractérise par la présence d'un signal fiable précédant l'événement (Bassett et Buchanan-Smith 2007). Dans le cadre d'une expérimentation portant

sur la prévisibilité associative chez les ovins, Greiveldinger *et al.* (2007) ont montré que les agnelles peuvent évaluer les événements se produisant dans leur environnement en fonction de leur prévisibilité, et que cette évaluation module leurs réponses émotionnelles (moins de sursauts, tachycardie moins importante). La prévisibilité est également impliquée dans des expériences émotionnelles positives comme l'anticipation positive dans le cadre d'un conditionnement classique (Boissy *et al.* 2007b). L'imprévisibilité de l'environnement modifie donc les réponses émotionnelles (comportement de surprise, rythme cardiaque) mais peut aussi nuire ultérieurement aux capacités cognitives des animaux d'élevage.

Il est cependant important de préciser que les effets de la prévisibilité (ou de son absence) sont étroitement liés à ceux de la contrôlabilité. Certains auteurs suggèrent même que la relation entre ces deux facteurs (prévisibilité et contrôlabilité) est si étroite que la compréhension complète de l'un ne peut pas être atteinte sans l'autre (Mineka et Hendersen 1985). Un événement est considéré comme contrôlable par un animal si le comportement de ce dernier modifie l'occurrence de l'événement (Overmier *et al.* 1980, Sambrook et Buchanan-Smith 1997). Haskell *et al.* (2004) ont montré chez le poulet que le manque de contrôle peut induire un état de résignation acquise (« *learned helplessness* » en anglais) : le sujet exposé à des stimuli aversifs auxquels il ne peut échapper devient alors incapable d'apprendre à éviter les stimuli aversifs suivants. Au contraire, la possibilité d'exercer un contrôle sur l'environnement peut réduire les effets des événements aversifs chez les animaux d'élevage. Ainsi, chez le porc, la possibilité de contrôle réduit les réactions de peur (Puppe *et al.* 2007) et favoriserait même la cicatrisation (Ernst *et al.* 2006).

En élevage, les tensions électriques parasites sont des phénomènes imprévisibles car le plus souvent aucun signal ne prévient l'animal de leur présence. Dans le cadre de cette thèse, nous avons émis l'hypothèse que des tensions électriques imprévisibles seraient plus négatives que des tensions électriques appliquées de manière prévisible, l'imprévisibilité pouvant même générer une réponse de stress chronique. Cependant, malgré leur imprévisibilité temporelle, les tensions électriques parasites sont parfois uniquement localisées à un endroit précis (*ex.* abreuvoir ou salle de traite). Dans ce cas, l'animal peut éventuellement contrôler son exposition à la tension électrique parasite en évitant ce lieu. Malheureusement, ce comportement est incompatible avec les besoins vitaux de l'animal (cas de l'abreuvement) ou avec les obligations liées à l'élevage (cas de la salle de traite).

2.2.5. *Expérience passée et réactivité émotionnelle*

Les processus cognitifs sont à l'origine des émotions, cependant les émotions peuvent en retour influencer les processus cognitifs. De nombreux travaux en psychologie humaine montrent combien le vécu émotionnel peut modifier la manière dont l'individu traite les informations provenant de son environnement (revue de Boissy *et al.* 2007a). Cela concerne à la fois des altérations de l'attention, de la mémoire voire du jugement porté sur la situation.

L'anxiété induit une attention excessive pour les informations menaçantes (Bradley *et al.* 1997). De plus, les événements chargés émotionnellement sont plus facilement mémorisés que des événements neutres (Reisberg et Heuer 1995). Des sujets ayant été exposés à des événements à forte valence négative tendent à interpréter négativement tout nouvel événement ambigu (Wright et Bower 1992). De telles modifications cognitives consécutives à une émotion existent chez l'animal (Paul *et al.* 2005). Ainsi, des génisses fortement stressées sont incapables d'abandonner un comportement préalablement appris alors qu'il n'est plus récompensé, ce qui les empêche d'acquérir un nouveau comportement plus approprié à la situation (Lensink *et al.* 2006). Par ailleurs, il a été montré chez les rongeurs que l'expérience passée et notamment une expérience stressante peut, à long terme, influencer la réactivité émotionnelle (Adamec *et al.* 2004) et diminuer les capacités cognitives (El Hage *et al.* 2006).

2.2.6. Agents stressants en élevage

Durant leur vie, les animaux d'élevage sont confrontés à diverses situations et peuvent être soumis à un nombre important d'agents stressant qui peuvent varier en intensité et en durée. Certains agents stressants sont relativement ponctuels (*ex.* la tonte ou certaines pratiques vétérinaires) ou peuvent durer plus longtemps (*ex.* une densité d'animaux importante, des contacts négatifs avec l'éleveur). Ces agents stressants peuvent être liés à des facteurs sociaux ou environnementaux.

Facteurs sociaux. Les espèces grégaires, comme les ovins, sont sensibles à l'isolement (Price et Thos 1980). L'isolement provoque une réponse de l'axe catécholaminergique (Rudramma *et al.* 2003) ainsi qu'une activation immédiate et prolongée de l'axe corticotrope (Boissy et Le Neindre 1997). Les réponses physiologiques des ovins (augmentation de la concentration plasmatique en cortisol et en noradrénaline) sont plus fortes en situation d'isolement que lors de manipulations ou de contention (Parrott 1990).

De même, une augmentation de la densité (Remience *et al.* 2008) ou une modification de la composition du groupe d'élevage (instabilité sociale) (Coutellier *et al.* 2007) peut entraîner une augmentation du nombre d'agressions entre les animaux. Par ailleurs, chez le veau, l'instabilité sociale (changements réguliers du partenaire social et de la case d'élevage) a entraîné un stress chronique qui a modifié l'axe corticotrope et la réactivité comportementale (Boissy *et al.* 2001, Veissier *et al.* 2001). Dans des systèmes d'élevage intensif de bovins (Fisher *et al.* 1997) ou de volailles (McLean *et al.* 2002), une densité élevée d'animaux peut causer des modifications comportementales, une réduction de la croissance ainsi qu'une augmentation de l'indice de consommation. De même, une diminution de l'espace offert aux porcs en finition entraîne des changements comportementaux (moins d'exploration) et physiologiques (augmentation des glucocorticoïdes après injection d'ACTH) ainsi qu'une baisse de productivité (diminution du gain moyen quotidien et augmentation de l'indice de consommation) (Meunier-Salaün *et al.* 1987).

Les interactions Homme-Animal peuvent être également une source de stress pour les animaux d'élevage (revue de Boivin *et al.* 2003). En effet, les attitudes et comportements des éleveurs et ouvriers agricoles peuvent influencer le bien-être des animaux dans des systèmes d'élevage intensif (Hemsworth *et al.* 1993) ou extensif (Le Neindre *et al.* 1996).

Facteurs environnementaux. Certaines pratiques d'élevage comme la coupe de queue (Molony et Kent 1997), la castration et l'écornage, ou certaines procédures vétérinaires (*ex.* palpation rectale de l'appareil reproducteur, injection intramusculaire, prise de sang...) peuvent être assimilées à des agents stressants aigus et peuvent provoquer une sécrétion importante des catécholamines ou des glucocorticoïdes (Alam et Dobson 1986). D'autres pratiques d'élevage peuvent également être considérées comme des agents stressants en raison des réponses induites au niveau du système catécholaminergique et de l'axe corticotrope. C'est le cas de la tonte (Mears *et al.* 1999), du transport (Roussel *et al.* 2005), de l'exposition à un prédateur (chien de berger) (Van Tien *et al.* 1999) et de la contention (Morrison *et al.* 2007). Par ailleurs, un environnement d'élevage de mauvaise qualité sur le plan sanitaire (revue de Merlot 2004) ou du confort (Zanella *et al.* 1996) peut être considéré comme un agent stressant pour les animaux d'élevage.

Les courants électriques parasites présents au sein des bâtiments d'élevage peuvent être considérés comme un agent stressant. Ils sont caractérisés par des composantes internes telles que l'intensité et la fréquence. Des composantes externes sont également susceptibles de moduler la réponse des animaux d'élevage à ces courants : la soudaineté, la nouveauté, l'imprévisibilité temporelle, l'imprévisibilité spatiale et la contrôlabilité. Certaines de ces composantes sont décrites comme positives et d'autres comme négatives et induire des réponses de peur (Puppe *et al.* 2007). En fonction des conditions d'environnement mais aussi en fonction des individus (de leur expérience passée, de leur réactivité émotionnelle...), l'influence respective de ces différentes composantes des courants électriques parasites peut varier d'un élevage à l'autre. La nouveauté est une composante dont la valeur aversive est importante chez les animaux d'élevage (Boissy et Bouissou 1995). Au fur et à mesure des confrontations, cette nouveauté évolue vers de la familiarité dont la valeur peut être qualifiée de bénéfique (c'est-à-dire non aversive) pour l'animal en élevage puisqu'elle permet d'atténuer les réponses de stress des animaux (Takeda *et al.* 2003, Désiré *et al.* 2004). L'imprévisibilité spatiale et temporelle des courants électriques parasites est une composante dont la valeur aversive peut être importante tandis que la contrôlabilité est bénéfique pour l'animal car elle permet probablement d'atténuer le côté aversif de cet agent stressant. Les réponses des animaux aux courants électriques parasites seront probablement différentes selon la valeur de ces composantes.

Nous avons émis l'hypothèse qu'une exposition à des tensions électriques pourrait induire une réponse de stress aigu à court terme et probablement une réponse de stress chronique à moyen terme chez les bovins et les ovins.

2.3. Electricité

2.3.1. Généralités

Les électrons de certains métaux, tels que le cuivre et l'aluminium, présentent la particularité de pouvoir facilement quitter leur atome. Ces métaux sont appelés des conducteurs. C'est la circulation des électrons dans un matériau conducteur qui crée le courant électrique. Schématiquement, le courant passe lorsque, dans un flux non interrompu, l'électron libre d'un atome chasse l'électron libre de l'atome voisin et prend sa place.

Dans le cas du courant alternatif, le mouvement des électrons se fait successivement dans un sens, puis dans l'autre, les électrons se déplaçant alors sur des distances de l'ordre du micromètre. Le courant alternatif est produit par la rotation d'un alternateur (schématisé par une bobine de fil conducteur) tournant dans un champ magnétique. Cette rotation génère dans la bobine un courant alternatif, c'est-à-dire un mouvement de va et vient des électrons, dont la fréquence varie en fonction de la vitesse de rotation de la bobine. Ainsi, une bobine tournant à 50 tours par seconde génère un courant alternatif de 50 Hertz (Hz). En Europe, la fréquence du courant est de 50 Hz alors qu'elle est de 60 Hz dans les pays anglo-saxons.

L'accumulation de charges électriques dans un matériau se traduit par l'apparition d'un potentiel électrique, également appelé tension (mesurée en volts, V). Cette accumulation de charges crée un champ électrique qui se manifeste sous la forme d'une force qui s'exerce sur les autres charges électriques avoisinantes : force attractive pour les charges de signes opposés, force répulsive pour les charges de même signe. Le champ électrique, dont l'unité de mesure est le volt par mètre (V/m), traduit l'influence de la tension électrique à distance.

L'intensité du courant, qui s'exprime en ampères (A), mesure le flux des électrons dans le conducteur. Pour mieux comprendre ces grandeurs physiques (tension et intensité), il est possible de comparer la circulation des électrons dans un conducteur à celle de l'eau dans un tuyau. La tension électrique est comparable à la pression dans le tuyau dont le robinet d'extrémité est fermé. De même, l'intensité du courant électrique est assimilable au débit de l'eau qui circule lorsque le robinet est ouvert. La puissance du jet d'eau correspond au résultat de la pression et du débit disponible. Ainsi, la puissance électrique (mesurée en watt, W) est le produit de l'intensité par la tension (RTE 2009).

2.3.2. Conséquences de l'exposition à une tension électrique

Les tissus biologiques ont la capacité de conduire un courant électrique. En général, cette propriété est caractérisée par la résistivité et la permittivité. La résistivité d'un tissu biologique (ou d'un matériau) représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de tissu (ou de matériau) de 1 mètre de longueur et de 1 m^2 de section et est exprimée en ohm-mètre ($\Omega \text{ m}$). La résistivité des tissus biologiques dépend de la fréquence du courant (Gabriel *et al.* 1996a) mais aussi de la

température (Geddes et Baker 1967). La permittivité décrit la réponse d'un milieu à un champ électrique et correspond au rapport D/E du déplacement électrique (également appelé induction électrique, D , en coulombs par m^2) et de l'intensité du champ électrique (E , en volt par mètre). D'autres paramètres tels que l'état physiologique (*ex.* hématokrite) ou encore l'âge de l'individu influencent les propriétés électriques des milieux biologiques. Ainsi, la résistivité du sang diminue conjointement à la diminution de l'hématocrite (Jaspard *et al.* 2003) et la résistivité des tissus diminue avec l'âge (Peyman *et al.* 2001).

Dans les tissus biologiques, les ions des milieux intra et intercellulaires sont des charges libres susceptibles de créer des courants électriques. Ces ions peuvent se déplacer plus ou moins librement sous l'effet d'un champ électrique. Par ailleurs, la présence de molécules polaires électriques de tailles diverses participe à la propagation du courant électrique. Le corps humain (ou celui des animaux d'élevage) présente donc des propriétés électriques fortement hétérogènes aux niveaux microscopique (structures cellulaires) et macroscopique (organes). La structure microscopique d'un tissu peut parfois lui conférer des propriétés électriques macroscopiques anisotropes (dépendant de la direction) : c'est le cas des muscles, par exemple, qui sont constitués de cellules très allongées dans une seule direction (Bernard 2007).

Le courant électrique pénètre dans l'organisme par un point d'entrée et en ressort par un point de sortie. La quantité de courant qui va parcourir l'organisme dépend notamment des caractéristiques de ces points (chapitre 1). Après le franchissement du point d'entrée (muqueuse, peau ou phanères), le courant électrique emprunte les voies conductrices riches en électrolytes et en eau telles que les vaisseaux ou les voies nerveuses. Le passage du courant par les voies nerveuses explique pourquoi l'organisme perçoit le stimulus électrique sous la forme de fourmillements ou d'une légère secousse musculaire. Le courant suit alors le trajet le plus court et présentant le moins de résistance pour rejoindre la terre (point de sortie) (IUMT 2009). Le passage du courant dans l'organisme se traduit par une sensation d'inconfort voire de douleur. L'existence d'une sensation douloureuse est à nuancer dans la mesure où elle est dépendante de l'intensité du courant appliqué et peut donc être totalement absente pour un courant faible. Il est ici possible de parler de douleur dans le sens où l'organisme détecte le passage du courant comme étant un stimulus nociceptif, confrontant l'organisme à une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable (IASP 1979).

Le passage du courant électrique le long des voies nerveuses explique la sensation d'inconfort voire de douleur ressentie par l'organisme. Par ailleurs, la soudaineté du passage du courant électrique à travers l'organisme et la surprise qu'il génère contribuent probablement à la sensation désagréable perçue lors du passage du courant.

2.3.3. Détermination du niveau de tension appliqué au cours des expérimentations

Les seuils de réaction persistante à la tension électrique obtenus à court terme chez la génisse (chapitre 3 partie 1) et chez les ovins (Duvaux-Ponter *et al.* 2005), nous ont permis de déterminer le niveau de tension à appliquer à moyen terme chez les vaches laitières et chez les agneaux.

Notion de seuil. Dans le cadre de cette thèse, nous avons été confrontés à la question de la définition du terme seuil. Sur le plan sémantique, le dictionnaire Le Petit Larousse définit le seuil physiologique comme étant « l'intensité minimale d'un excitant pour provoquer une réaction ». Cette définition est complétée dans le domaine de la psychologie comme étant le « minimum perceptible », le seuil absolu correspondant alors à « l'intensité minimale que doit atteindre une stimulation quelconque pour être sentie ». Dans le domaine médical, le seuil se définit comme « le degré limite d'un excitant au-dessous duquel il n'y a plus de sensation » ; ou comme « le point critique correspondant à un certain taux de dilution, de solution ou de mélange qui marque l'apparition d'un phénomène » (Garnier et Delamare 1985). La notion de seuil se distingue des lois continues et lisses pour lesquelles le phénomène apparaît au fur et à mesure de l'augmentation (ou de la diminution) de la valeur de la variable. En effet, la notion de seuil implique l'apparition d'un phénomène à partir d'une valeur donnée de cette variable. Comme cela a été montré dans le chapitre 1, la réponse d'un individu à un niveau de tension électrique va dépendre de la résistance de l'individu. Cependant, pour chaque individu, trois seuils distincts de réponse à la tension électrique peuvent être définis dont les descriptions ont été données dans le chapitre 1 : un seuil de sensation, un seuil de réaction transitoire et un seuil de réaction persistante.

Niveau de tension appliqué à moyen terme. En élevage, le niveau des tensions électriques parasites est généralement inférieur au volt. Cependant, dans des situations exceptionnelles, telles que des défauts d'isolement au niveau d'une clôture électrique ou de prises électriques, des tensions de plusieurs dizaines de volts peuvent être ponctuellement mesurées. Plusieurs possibilités ont été envisagées pour le choix du niveau de tension à appliquer à moyen terme. La première possibilité consistait à appliquer une tension de niveau similaire à celui mesuré le plus souvent en élevage. La deuxième possibilité était de se placer au niveau du seuil de réaction persistante mesuré lors des expérimentations à court terme. La troisième possibilité était d'appliquer une tension électrique légèrement supérieure au seuil de réaction persistante obtenu afin de se placer dans la situation où cette tension est détectée par un grand nombre d'animaux. Après discussion avec le GPSE, cette dernière solution a été choisie avec deux hypothèses par rapport à la poursuite éventuelle des recherches sur les effets des tensions en élevage :

- dans le cas d'une absence de réponses, il est fort probable qu'un niveau inférieur n'entraînerait pas de réponse de la part des animaux

- dans le cas contraire, c'est-à-dire si des réponses étaient observées, alors il deviendrait intéressant d'appliquer un niveau de tension similaire à celui mesuré le plus souvent en exploitation agricole

2.4. Conséquences économiques potentielles des tensions parasites en élevage

La présence de tensions électriques parasites en élevage pourrait entraîner des problèmes économiques et sociaux pour les éleveurs concernés, en plus des conséquences éventuelles sur le bien-être des animaux.

Les tensions électriques parasites sont parfois mises en cause lorsqu'une diminution des performances de production (quantité et qualité du lait, croissance des animaux) est constatée en élevage. C'est pourquoi, durant cette thèse, une attention particulière a été portée sur les critères zootechniques. L'essentiel des attentes des éleveurs concernant l'étude des effets des tensions électriques parasites porte sur les critères zootechniques et sanitaires car ceux-ci sont directement liés aux performances technico-économiques de leur élevage. Ainsi, pour les éleveurs laitiers, la quantité de lait produite et sa composition (taux butyreux, taux protéique et comptage cellulaire) interviennent dans le paiement du lait (Code Rural 2000). Lors de notre expérimentation sur les vaches laitières nous avons donc mesuré la production laitière quotidiennement et la composition du lait de manière hebdomadaire.

Pour atteindre de bonnes performances économiques dans les élevages destinés à la production de viande, qu'elle soit bovine, ovine ou porcine, l'éleveur a comme objectif de produire de la viande au meilleur coût possible, c'est-à-dire avec un gain moyen quotidien le plus élevé possible (prise de poids importante) tout en ayant un indice de consommation le plus faible possible (faible consommation d'aliment). Par ailleurs, les caractéristiques de la carcasse (sa conformation et son état d'engraissement) interviennent dans le paiement à l'éleveur (Commission Regulation (EEC) No 461/93 1993). Lors de l'expérimentation sur les agneaux, le gain moyen quotidien des animaux, la conformation et l'état d'engraissement des carcasses, ainsi que l'évolution de la température et du pH de la carcasse post-mortem ont été étudiés, ces deux derniers critères ayant une influence sur la dénaturation des protéines, l'oxydation des lipides, la couleur, la rétention d'eau et les caractéristiques sensorielles de la viande (Rosenvold et Andersen 2003, Okeudo et Moss 2005).

2.5. Méthodologie générale

2.5.1. *Choix des modèles animaux*

Dans le cadre des premiers travaux en collaboration avec RTE, notre équipe de recherche a choisi de travailler sur un modèle de petite taille, les ovins, afin de mettre en place les dispositifs expérimentaux et de préparer les futures expérimentations qui devaient se dérouler à terme sur les vaches laitières. En plus de l'aspect pratique, le deuxième intérêt de travailler sur le modèle ovin était la quasi-absence d'études sur les effets des tensions électriques chez cette espèce. Le troisième intérêt a été de disposer d'un modèle d'animal en croissance utilisé pour la production de viande. Les expérimentations se sont attachées à étudier le comportement (agnelles), la physiologie du stress (agneaux et agnelles) et les performances zootechniques (qualité des carcasses des agneaux) des animaux soumis à une tension électrique. Cette répartition des thèmes étudiés en fonction du sexe s'explique par le fait qu'en élevage ovin, les mâles sont généralement destinés à la boucherie alors que les femelles sont conservées pour le renouvellement du troupeau. De plus, les femelles semblent exprimer plus fortement leurs réponses émotionnelles que les mâles (Vandenheede et Bouissou 1993, Boissy *et al.* 2005).

Dans le cadre de cette thèse, parallèlement aux expérimentations à moyen terme conduites sur les ovins, une expérimentation à court terme a été menée chez des génisses afin de déterminer le seuil de réaction des bovins aux tensions électriques. Le choix de la génisse comme modèle d'étude était justifié par la facilité de manipulation (par rapport aux vaches), par l'absence de la contrainte de la traite deux fois par jour et par le fait que ces jeunes animaux étaient *a priori* sans expérience des tensions électriques parasites. Après la détermination du seuil de réaction persistante aux tensions électriques chez les génisses, une expérimentation à moyen terme a été conduite chez des vaches laitières en production, dans des conditions d'élevage.

Les caractéristiques technico-économiques des élevages de la ferme expérimentale de Grignon où se sont déroulées les expérimentations sont précisées en annexe 3. Les dispositifs expérimentaux qui ont dû être mis en place pour les expérimentations sont décrits en annexe 4.

2.5.2. *Justification de la durée des expérimentations à moyen terme*

La plupart des études de la littérature se sont intéressées aux effets des tensions électriques à court terme. Or, après une réponse initiale de stress aigu, il est probable que l'animal s'adapte (réponse d'adaptation de Selye), cette phase d'adaptation pouvant être suivie par une phase d'épuisement (Selye 1976), notamment si l'agent stressant reste présent sur le moyen ou long terme.

La durée de 8 semaines d'exposition pour les vaches laitières représente près de 20 % de la durée théorique de lactation de 305 jours. Dans la plupart des expérimentations une tension

(ou un courant) électrique a été appliquée sur une durée de maximum 1 à 2 semaines chez la vache laitière (Lefcourt 1982, Lefcourt et Akers 1982, Norell *et al.* 1983, Gorewit *et al.* 1985, Gustafson *et al.* 1985, Henke Drenkard *et al.* 1985, Lefcourt *et al.* 1985, Gorewit et Scott 1986, Lefcourt *et al.* 1986, Aneshansley *et al.* 1992, Reinemann *et al.* 1999a, Reinemann *et al.* 1999b, Reinemann *et al.* 2002, Reinemann *et al.* 2003, Reinemann *et al.* 2005). Seule une expérimentation a déjà été conduite sur une lactation complète (Gorewit *et al.* 1992). Le choix de notre durée d'étude avec les vaches laitières (chapitre 3 parties 2 et 3) correspond donc à un compromis entre la possibilité de mettre en évidence un stress chronique et les contraintes d'élevage de la Ferme Expérimentale d'AgroParisTech (nombre d'animaux disponibles, tarissement éventuel en cours d'expérimentation, taille de l'enclos expérimental), les procédures expérimentales (nombre, complexité et coût des mesures) ainsi que les contraintes humaines. Cette durée correspond à l'échelle de temps utilisée (comprise entre 4 et 15 semaines) pour étudier le stress chronique lié à différentes conditions d'élevage chez des veaux de boucherie (Veissier *et al.* 2001) et des porcs (Coutellier *et al.* 2007).

2.5.3. Avertissement, applicabilité en conditions d'élevage

Ce paragraphe est un avertissement qui invite l'utilisateur éventuel de cette thèse à prendre en compte **tous** les paramètres entourant la réalisation de protocoles expérimentaux sur les tensions électriques parasites et leurs limites avant de les appliquer en conditions d'élevage. En effet, les mesures comportementales (rythme d'activité, comportement de buvée...), physiologiques (concentrations en cortisol, rythme cardiaque...) et de production (quantité, composition du lait...) réalisées au cours de cette thèse ont été conduites par des **personnes formées**. De plus, les installations expérimentales, bien que situées sur une exploitation agricole, ont été **aménagées** afin de maîtriser totalement l'exposition à une tension électrique (pas de courants de fuite par exemple), tout en disposant également d'un lot d'**animaux témoins** (non confrontés à des courants électriques) dans les mêmes conditions environnementales que les animaux soumis à des courants électriques. Enfin, une **période d'habituation** a permis aux animaux de se familiariser aux dispositifs et aux procédures expérimentales et d'éviter ainsi des biais expérimentaux. Il nous semble également prudent de rappeler que l'interprétation de nos résultats repose sur une analyse **multicritère** de variables **comportementales, physiologiques** et de **production** collectées de **manière simultanée**. Ainsi, la prise en considération d'une seule variable ne permet pas, à elle seule, de conclure à un effet du facteur étudié.

Chapitre 2 - Effets des courants électriques chez les ovins

Préambule

La majeure partie des expérimentations sur les effets des tensions parasites ont été réalisées chez les bovins et les porcins. A part des observations conduites sur le terrain, les effets des courants parasites à moyen terme sur les ovins n'ont pas été étudiés.

Les deux expérimentations conduites avec des agneaux en croissance avaient pour objectif d'étudier, au moyen d'une approche multicritère, en conditions d'élevage et à moyen terme, les effets d'une tension électrique appliquée au niveau de l'abreuvoir sur les réponses comportementales et physiologiques ainsi que les performances zootechniques des animaux. Cette approche a été privilégiée afin d'évaluer les réponses de stress aigu et de mettre en évidence une éventuelle réponse de stress chronique à moyen terme.

Pour des raisons pratiques liées à la disponibilité des animaux et au nombre de places dans le dispositif expérimental, les expérimentations sur les ovins se sont déroulées en deux périodes (figure 3). Une expérimentation plus approfondie sur les performances zootechniques et sur la physiologie du stress a été conduite chez les mâles : des mesures à l'abattoir (activité des glandes surrénales, qualité de la carcasse) en plus des mesures zootechniques (croissance et consommation d'eau) et physiologiques de stress (concentration plasmatique en cortisol, rythme cardiaque) (chapitre 2 partie 1). Une deuxième expérimentation plus approfondie sur les critères comportementaux a été conduite chez les femelles : réalisation de mesures sur la physiologie du stress (concentration plasmatique en cortisol, épreuve à l'ACTH, rythme cardiaque) ainsi que des mesures comportementales (rythme d'activité, comportement à l'abreuvoir et réactivité émotionnelle). Comme les résultats concernant les mesures physiologiques et comportementales réalisées chez les femelles n'ont pas été totalement dépouillés, cette expérimentation ne sera pas présentée dans le cadre de cette thèse (annexe 2). Seuls les résultats concernant la motivation des agnelles en situation de test ainsi que la représentation d'un lieu chargé négativement sur le plan des émotions (réactivité émotionnelle) seront présentés.

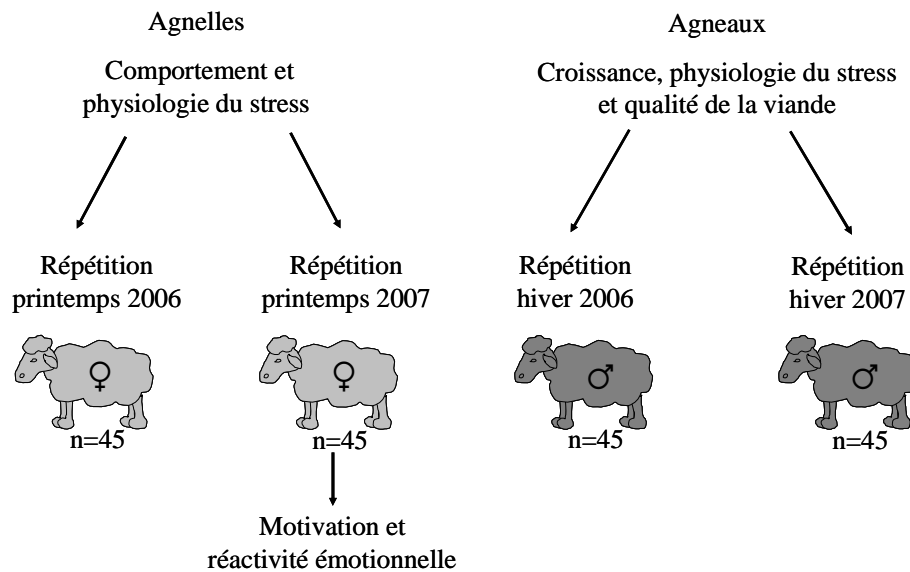


Figure 3. Expérimentations conduites sur les effets des courants électriques chez les ovins.

1. Expérimentation à moyen terme sur les agneaux mâles

1.1 Objectifs

L'objectif de cette expérimentation a été de déterminer les effets à moyen terme d'une exposition en permanence ou de manière aléatoire à une tension électrique au niveau de l'abreuvoir sur la physiologie du stress et les performances zootechniques d'agneaux en croissance. Des mesures ont été réalisées à l'abattoir en plus des mesures en élevage.

1.2 Matériel et méthodes

Quatre-vingt-dix agneaux de race Romane (ex INRA 401) ont été testés au cours de deux répétitions correspondant à deux hivers successifs ($n = 2 \times 45$) (figure 1). Après 1 semaine d'habituatation au dispositif expérimental, une tension de 3,5 V (courant alternatif, 50 Hz) a été appliquée à l'abreuvoir pendant 6 semaines, soit de manière permanente (PERM, $n = 30$), soit de manière aléatoire 34 heures/semaine (RAND, $n = 30$). Les animaux restants n'ont reçu aucune tension (CONT, $n = 30$).

Les quantités d'aliment ingérées par lot ont été enregistrées quotidiennement, et les animaux ont été pesés chaque semaine. La quantité d'eau bue par lot a été enregistrée deux fois par jour. Deux prélèvements sanguins espacés d'une heure ont été réalisés la première semaine et la sixième semaine afin de mesurer la concentration plasmatique en cortisol. La fréquence cardiaque a été mesurée entre 8 heures et 18 heures afin d'évaluer son évolution entre l'entrée et la sortie de la stalle d'abreuvement. Ces mesures ont été réalisées la première et la troisième semaine d'exposition à l'agent stressant.

Les agneaux ont été abattus à l'âge de 4,5 mois dans un abattoir commercial. La concentration plasmatique en cortisol lors de la saignée ainsi que le poids des médullo-surrénales et

l'activité de la TH et de la PNMT ont été mesurés. Concernant la carcasse, le pH et la température du *M. logissimus dorsi* ont été mesurés 30 minutes, 3 heures et 24 heures *post-mortem*, et la conformation et l'état d'engraissement ont été appréciés.

1.3 Résultats

Aucune différence entre les traitements n'a été observée concernant la croissance et la quantité d'eau bue. La concentration plasmatique basale en cortisol la première et la sixième semaine, et le rythme cardiaque à l'entrée et à la sortie de la stalle d'abreuvement n'ont pas été différents entre les traitements. Aucune différence n'a été observée entre les traitements pour l'évolution du pH et de la température, 30 minutes, 3 heures et 24 heures *post-mortem* du *M. logissimus dorsi*, le rendement carcasse, la conformation et l'état d'engraissement.

Au moment de la saignée, les agneaux exposés en permanence à la tension électrique ont eu une concentration plasmatique en cortisol plus faible que les agneaux témoins. De plus, les médullo-surrénales des agneaux exposés en permanence à la tension électrique ont été plus lourdes que celles des agneaux témoins. Enfin, dans les carcasses de bonne conformation (catégorie R dans la classification EUROP), un plus petit nombre de carcasses grasses a été enregistré chez les agneaux exposés à la tension électrique de manière permanente ou aléatoire par rapport aux agneaux témoins.

1.4 Discussion et conclusion

Aucun effet de l'exposition à moyen terme à une tension électrique parasite au niveau de l'abreuvoir n'a été observé sur la croissance et sur l'ingestion d'eau chez l'agneau mâle. De plus, peu d'effets liés à l'exposition à une tension électrique imprévisible ont été mis en évidence. Plusieurs indicateurs comme le nombre moins important de carcasses grasses, la plus faible concentration plasmatique en cortisol lors de l'abattage et le poids plus important des médullo-surrénales, suggèrent que l'exposition en permanence à une tension électrique parasite pourrait induire une modification de la physiologie du stress chez l'agneau, indiquant probablement la présence d'un stress chronique modéré dans ce contexte expérimental. Une analyse plus approfondie réalisée sur le comportement des agnelles devrait nous permettre de confirmer ou non ces conclusions.

2. Expérimentation à moyen terme sur les agnelles

2.1 Objectifs

En élevage, les femelles sont conservées pour le renouvellement et ont un cycle de vie plus long que les mâles sur l'exploitation. L'objectif de cette expérimentation a été d'étudier si une exposition en permanence ou de manière aléatoire à une tension électrique au niveau de l'abreuvoir à moyen terme pouvait modifier la motivation à ingérer un renforcement dans une situation de test ainsi que la représentation d'un lieu potentiellement chargé négativement sur le plan des émotions (une réplique de la stalle d'abreuvement).

2.2 Matériel et méthodes

Quarante-cinq agnelles de race Romane (ex INRA 401) ont été habituées au dispositif expérimental pendant une semaine. Puis, une tension de 3,5 V (courant alternatif, 50 Hz) a été appliquée à l'abreuvoir pendant 8 semaines, soit de manière permanente (PERM, n = 15), soit de manière aléatoire 34 heures/semaine (RAND, n = 15). Les animaux restants n'ont reçu aucune tension (CONT, n = 15).

Après une habitude au dispositif, les agnelles ont été testées individuellement, la 8ème semaine d'exposition à la tension, sur quatre jours au cours de quatre épreuves de 3 minutes suivant un dispositif en carré latin : elles recevaient comme renforcement soit du concentré, soit de l'eau, et ce renforcement était localisé soit au sol, soit dans une réplique de la stalle d'abreuvement. Les agnelles étaient équipées de ceintures cardiaques, leur comportement était enregistré ainsi que les quantités consommées de renforcement.

2.3 Résultats

Les agnelles exposées aux tensions de manière permanente ou aléatoire ont ingéré une quantité plus importante de concentré que les agnelles témoins (chapitre 2 partie 2 et annexe 5). Les agnelles exposées de manière aléatoire à l'agent stressant ont été plus rapides que les agnelles témoins à rejoindre le renforcement, quel que soit le renforcement (chapitre 2 partie 2 et annexe 5). De plus, aucun effet du traitement n'a été observé sur le nombre de vocalisations et le temps pour rejoindre le renforcement en présence de la réplique de la stalle d'abreuvement.

2.4 Discussion

La stalle d'abreuvement dans laquelle les agnelles avaient été exposées à l'agent stressant pendant la phase d'élevage ne semble pas avoir été perçue négativement durant la situation de test. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette absence de différence. i) L'abreuvoir plutôt que la stalle aurait été perçu négativement pendant les 8 semaines d'exposition à la tension ii) L'endroit dans l'enclos d'élevage plus que la stalle d'abreuvement elle-même pourrait avoir une valence négative sur le plan des émotions. iii) Les animaux se seraient habitués à l'agent stressant pendant les 8 semaines d'exposition, et la stalle d'abreuvement pourrait avoir perdu sa valence négative.

Les agnelles ayant l'expérience d'un agent stressant modéré et imprévisible semblent mieux gérer une situation inhabituelle de tests que les animaux témoins. Le fait d'expérimenter un stress modéré durant la période d'élevage pourrait faciliter l'adaptation ultérieure de l'animal à une situation nouvelle de challenge. Ces résultats restent cependant à confirmer.

Chapitre 2 - Effets des courants électriques chez les ovins

Partie 1

1. Effects of stray voltage on the physiology of stress, growth performance and carcass parameters in Romane male lambs

*Effet d'une exposition répétée à des tensions électriques parasites sur la croissance, la physiologie du stress et les paramètres de la carcasse d'agneaux de race Romane
Small Ruminant Research (accepté, après modifications mineures)*

Effects of stray voltage on the physiology of stress, growth performance and carcass parameters in Romane male lambs

Karim Rigalma ^{(1)*}, Christine Duvaux-Ponter ^(1, 2), Véronique Deiss ⁽³⁾, Cyril Charles ⁽¹⁾, Laure Deveau ⁽⁴⁾,
François Deschamps ⁽⁴⁾ and Sabine Roussel ^(1, 2)

⁽¹⁾ AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽²⁾ INRA UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽³⁾ INRA URH-ACS, UR1213 Herbivores, Site de Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle, France

⁽⁴⁾ Réseau de Transport d'Electricité, 34 rue Henri Regnault, 92400 Courbevoie, France

* Corresponding author

Tel.: 33 (0) 1 44 08 18 12; Fax: 33 (0) 1 44 08 17 52; E-mail address: rigalma@agroparistech.fr

Abstract

The effects of permanent or random exposure to stray voltage on a water trough were evaluated in growing-finishing Romane male lambs between the age of 13 and 19 weeks. Ninety lambs were assigned during two 6-week experimental periods to one of three treatments, with 30 animals in each treatment (15 per experimental period). The treatments were permanent exposure to voltage (PERM, 3.5 V) on the water trough, random exposure to voltage (RAND, 3.5 V, 34 hours/week) and no voltage exposure for the control group (CONT). No effects of voltage exposure were observed on production parameters: growth, average daily gain and water intake. The stress physiology seemed to be slightly modified with a lower plasma cortisol concentration at slaughter in PERM lambs compared to CONT lambs ($P < 0.05$) and a higher adrenal medulla weight in PERM lambs compared to CONT lambs ($P < 0.05$). However, no differences were observed between treatments on heart-rate, basal plasma cortisol concentration and tyrosine hydroxylase and phenylethanolamine-N-methyl transferase activities. Carcass yield, temperature and the pH of the *M. longissimus dorsi* were not modified by voltage exposure during rearing. In the good carcass conformation class (R class in EUROP grading scheme), there were fewer fat carcasses (grade 4 of 5) in the PERM and RAND compared to the CONT groups ($P < 0.05$). In conclusion, no major effects of voltage exposure were observed in male lambs on production, carcass parameters and stress physiology. Stray voltage could be considered as a mild stressor in growing-finishing lambs.

Keywords: stray voltage, lamb, unpredictability, chronic stress, carcass

1. Introduction

Electricity is essential to modern farming techniques and many electrically powered machines are used such as milking machines, automatic feed dispensers, antifreeze water bowls... Leakage of current from this type of equipments, electric and magnetic induction, faulty connections between the electrical circuit and the earth can lead to the undesirable electrical phenomenon called stray voltage (review by Deschamps, 2002). Stray voltage, usually less than 10 V, can produce a low current flowing through farm animals (Norell *et al.*, 1983; Gustafson, 2003). For the last decades, stray voltage has been considered as a possible factor impairing performance in dairy farms and in swine production. Producers and veterinarians have reported impaired production performance as well as increased health problems and behavioural modifications in cows and pigs housed in buildings where stray voltage was detected (review by Hultgren, 1990). So far, studies on stray voltage have been performed primarily in dairy cows and secondarily in pigs (review by Hultgren, 1990). Almost no scientific data are available on the effects of stray voltage in sheep. Moreover, on farms, stray voltage can occur in a random manner and can be unpredictable for the animals (Hultgren, 1990). Predictability of a stimulus or a stressor is important in relation to animal welfare (Désiré *et al.*, 2002; Bassett and Buchanan-Smith, 2007). Indeed, when a stressor occurs in an unpredictable way, it is more stressful for the animal than if the stressor occurs in a predictable way (Quirce *et al.*, 1981) which allows the animal to expect its occurrence and eventually to adapt.

The aim of this experiment was to investigate how random or permanent exposure to voltage on a water trough, during the growing-finishing period, affects the stress physiology, the growth performance and the carcass parameters of male lambs.

2. Material and Methods

This study was conducted during two consecutive years from December to January, in two identical repetitions. Each repetition included a one-week habituation to the pens and to the analysis procedures (blood sampling, cardiac strap wearing, weighing) and a 6-week experimental period.

2.1. Animals, feeding and housing

For each repetition, 45 Romane (INRA 401) male lambs, a crossbreed line between Romanov and Berrichon du Cher, progressively weaned from 49 to 67 day-old, were allocated to one of three groups according to age, weight and litter size (averages were respectively, 90 ± 4.5 days, 28.3 ± 4.71 kg and 2.6 ± 0.73 lambs, mean \pm s.d., $n = 90$). The lambs were housed in three similar pens ($3.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, width \times length, 15 lambs of the same treatment in each pen) containing a metallic water trough without enamel coating at the end of a stall (only one lamb could drink at any one time), a trough for concentrate and a straw rack. A fourth pen with non-experimental lambs was used as a buffer pen at the entrance of the building. The pens

were straw bedded. A plain wooden barrier 1.5 m high separated each pen from the others. Animals were fed twice a day at 09.00h and 17.00h with concentrate (41% barley, 17% corn, 41% rapeseed meal and 1% mineral and vitamins; 0.7 kilogram/lamb/meal) and straw was available *ad libitum*. Water and a mineral block were available at all times.

During repetition 1, one lamb of the control group was excluded from the experiment due to health problems (diarrhoea and loss of appetite).

2.2. Experimental treatments

The water troughs were electrically insulated from all the metallic parts of the pen. An aluminium plate (0.4×1.2 m, $w \times l$), isolated from the ground, was placed on the floor of the stall. EDF R&D (Electricité de France Research & Development) provided the electricity exposition system allowing application of the chosen alternating (50 Hz) voltage. A voltage of 3.5V was applied to the water trough to obtain a voltage pathway through the lamb from the muzzle to the 4 hooves (Fig. 1). The voltage level was determined in a preliminary experiment in order to obtain a current intensity through the animal in the same range as the threshold leading to aversion obtained in a previous experiment in lambs (Duvaux-Ponter *et al.*, 2005).

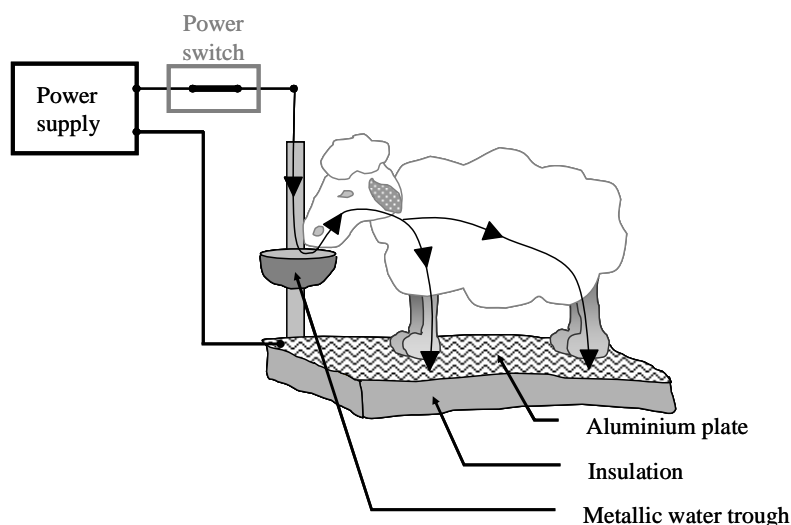


Figure 1. Simplified diagram of the electrical apparatus used to apply voltage from the muzzle to all hooves of Romane male lambs through a water trough placed at the end of a stall in the rearing pen.

During 6 weeks, lambs were exposed to a voltage of 3.5 V, either permanently (PERM; $n=30$; 15 animals per repetition), or randomly 34h a week with duration of exposition varying from 4 hours up to 16 hours (RAND; $n=30$; 15 animals per repetition). Thirty lambs (15 animals per repetition) were used as control and were not exposed to voltage (CONT). Pens were randomly allocated to the treatments for each repetition.

2.3. Production measurements

The animals were weighed once a week to determine their average daily gain. The quantity of water drunk (called water intake thereafter) was recorded twice a day at 09.00h and 17.00h for each pen during week 1, week 3, week 4 and week 6 of the experiment.

2.4. Carcass measurements

The animals were slaughtered at 134 ± 4.2 days (41.2 ± 6.30 kg of body weight, mean \pm s.d.). On two consecutive days for each repetition, with an even number of lambs from each treatment each day, lambs were transported to a commercial abattoir (one hour journey) where they remained 2 hours in lairage pens before slaughtering. Temperature and pH of the *M. longissimus dorsi* (at the level of the 12th rib) were measured directly on the carcass using a thermo-sensor and a glass electrode (WTW sentix, WTW, Weilhem, Germany) connected to a digisense pH meter (WTW ph305i, WTW, Weilhem, Germany). Measurements were performed at 30 min, 3 h and 24 h after the start of exsanguination (pH at 24h is called ultimate pH thereafter). Carcasses were weighed 30 min after exsanguination. The carcass yield was calculated using the body weight (week 6) and the weight of cooled carcass (98% of carcass weight). According to the EUROP grading scheme (Commission Regulation (EEC) No 461/93, 1993), the conformation was graded by a single assessor into excellent (E), very good (U), good (R), fairly good (O), or poor (P) and fatness was graded into very fat (5), fat (4), covered (3), fairly covered (2), or lean (1).

2.5. Stress physiology measurements

Heart rate measurements were performed at week 1 and week 3 of voltage exposure, three days a week with three animals per treatment recorded each day from 08.00h to 18.00h. The heart rate monitor used consisted of a watch receiver (Polar[®] S610i, Polar Electro, Oy, Finland) and two electrodes (Horse Trainer transmitter Polar[®], Fleurier, Switzerland) fitted on an elastic belt adjusted to the thorax size of the lambs. The contact between electrodes and skin was improved by small amounts of ultrasound gel smeared on the chest. The heart rate monitor works by averaging the R-R intervals of the QRS electrocardiogram wave complex over 5-s periods as detailed by (Karnoven *et al.*, 1984). This procedure was used previously in cows by Hopster and Blokhuis (1994) and in lambs by Roussel *et al.* (2004). After completion of data collection, the equipment was removed and the Polar[®] S610i was downloaded by IR communication via a Polar[®] Interface onto a computer via the software Polar Equine version 4.0 (Polar Electro, Oy, Finland). Cameras were placed above each trough and linked to time-lapse video-recorders. Videos were used to relate the presence of a lamb in the watering stall to its heart rate measurements. This allowed the calculation of the difference between mean heart rate the minute before entering the stall and mean rate in the stall, and the difference between mean heart rate in the stall and mean rate the minute after leaving the stall.

Due to loss of signal and chewing of cables, only part of the heart rate data files could be used (108 drinking sessions for 31 different lambs). When a lamb made several visits to the watering stall on the same day, data were averaged.

Blood samples were collected at week 1 and week 6 in order to obtain basal plasma cortisol concentrations at the beginning and at the end of the experiment. At least 1 hour before the beginning of sampling, each pen was sub-divided in 2 small pens, with half of the animals in each, in order to facilitate blood sampling procedure. The animals were habituated to this procedure during the week of habituation. Two blood samples were collected by jugular venipuncture at 14.30h and 15.30h and within 2 minutes of the experimenter handling the animal. This interval is likely to be insufficient for plasma cortisol concentration to have been affected by the handling associated with blood collection (Broom and Johnson, 1993). Moreover, Parrot *et al.* (1994) have shown in sheep that cortisol concentration returned to basal level in less than 30 minutes after handling. Basal cortisol concentrations for each week were calculated using the average of the two blood samples.

Blood samples were centrifuged at 3000 g for 10 minutes at 4°C. Plasma was stored at -20°C until analysis. Basal levels of total cortisol were measured by ELISA using an automated method (Elecsys, Roche Diagnostics, Meylan, France). The sensitivity of the cortisol assay was 0.36 ng.mL⁻¹. The inter-assay coefficient of variation was 4.5% at 124.69 ng.mL⁻¹.

At slaughter, exsanguination blood was collected in heparinized tubes and stored at 4°C for 1 h. Samples were centrifuged at 3000 g for 10 minutes at 4°C and plasma was stored at -20°C until determination of cortisol concentration. Slaughter levels of total cortisol were determined using a radioimmunoassay method with an antibody produced in rabbit (Boissy and Bouissou, 1994). The detection limit was 0.02 ng.mL⁻¹. Intra- and inter-assay coefficients of variation were 11 and 22% for low (4 ng.mL⁻¹) and 7 and 14% for high (32 ng.mL⁻¹) controls. The adrenal glands were recovered as soon as possible after exsanguination, frozen in liquid nitrogen and kept at -80°C until analysis. The mean length of time between slaughter and freezing of the adrenal gland in liquid nitrogen was less than 15 min.

The activities of phenylethanolamine N-methyl transferase (PNMT) that catalyses the N-methylation of noradrenaline to adrenaline and tyrosine hydroxylase (TH) that catalyses the conversion of tyrosine to dihydroxyphenylalanine (DOPA) were determined in the medulla of adrenals by the methods adapted from Waymire *et al.* (1971) and Axelrod (1962) by Veissier *et al.* (2001). The adrenal glands were dissected clear of surrounding tissue, the medulla were recovered, weighed (the sum of the weight of the two adrenal medullas is used thereafter), cut in half and homogenates of the two adrenal medullas of each lamb were mixed with a reactional mixture containing either [¹⁴C]tyrosine (for TH assay) or S-adenosyl-[¹⁴C]methionine (for PNMT assay). The results are expressed in quantity of product (¹⁴CO₂ for TH and ¹⁴C-methylethanolamine for PNMT) per unit of time and per mg of adrenal medulla gland. Intra- and inter-assay coefficients of variation were 4.34 and 4.13% for TH assay and 1.56 and

4.25% for PNMT assay for a control having a TH activity of 2.88 nmol/h/mg and a PNMT activity of 0.144 nmol/h/mg.

2.6. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using the Statistical Analysis System software (SAS[®], version 9.1.3). The MIXED procedure with comparison of the estimates (*t*-test based) was used with the following general model: $Y = \mu + T_j + R_k + T_j * R_k + BW0_i + e_{ijk}$; where μ represents the overall mean; T_j the fixed effect of the treatment with 3 modalities CONT, PERM and RAND; R_k the fixed effect of the repetition with 2 modalities repetitions 1 and 2; $T_j * R_k$ the interaction between the treatment j and the repetition k ; $BW0_i$ the body weight of the animal i on the week of habituation as a covariate and e_{ijk} the residual error. Concerning data collected during the 6-week exposure (water intake, body weight and heart rate), the model was completed with W_l the fixed effect of the week l ; $T_j * W_l$ the interaction between the treatment j and the week l ; and r_i the random effect of the animal i . Concerning data collected at the slaughterhouse, D_m the fixed effect of the day of slaughter was added, and $BW6_i$ the covariate body weight on the sixth week of voltage application replaced the covariate $BW0_i$.

When assumptions of homogeneity of variance and normal distribution of the residuals were not verified, a log or square root transformation was performed before carrying out the analysis. Qualitative data such as conformation and fatness of the carcass were analysed with a Chi-square test. All data are presented as least square means (LSMeans) \pm standard errors (SE) except when otherwise stated.

3. Results

3.1. Production measurements

No effects of treatment were observed on body weight. An interaction between treatment and week ($P < 0.01$) was observed: on week 2, PERM lambs were heavier than CONT lambs ($P < 0.01$) and tended to be heavier than RAND lambs ($P = 0.09$); on week 4 PERM lambs tended to be heavier than CONT lambs ($P = 0.10$) (Fig.2). No effects of treatment were found on the average daily gain during the 6-week exposure (296 ± 8.6 g/day, 310 ± 8.5 g/day and 296 ± 8.5 g/day, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). Moreover, no effect of treatment was observed on water intake (log back-transformed data, 3.4 ± 0.07 L/lamb/day, 3.4 ± 0.07 L/lamb/day and 3.4 ± 0.07 L/lamb/day, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). An effect of repetition was found on water intake ($P < 0.01$).

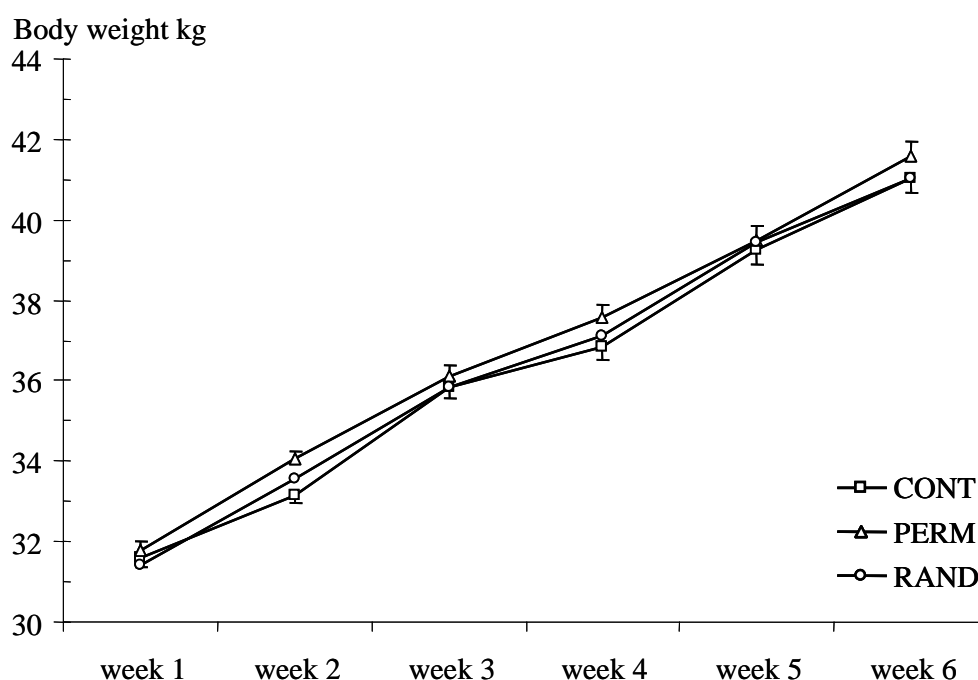


Figure 2. Evolution of body weight of Romane male lambs submitted to 6 weeks of voltage exposure (3.5 V applied on the water trough) permanently (Δ PERM, $n=30$), randomly (\circ 34h/week, RAND, $n=30$) or to no voltage exposure (\square CONT, $n=29$).

3.2. Carcass measurements

No effects of treatment were observed on carcass yield ($48 \pm 0.4\%$, $48 \pm 0.4\%$ and $49 \pm 0.4\%$, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). An effect of repetition was found ($P < 0.05$). No effects of treatment were observed on pH of the *M. longissimus dorsi* 30 min after slaughter (6.9 ± 0.03 , 6.9 ± 0.03 and 6.9 ± 0.03 for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$), 3 h after slaughter (6.6 ± 0.05 , 6.6 ± 0.05 and 6.6 ± 0.05 for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$) and 24 h after slaughter (5.8 ± 0.02 , 5.8 ± 0.02 and 5.8 ± 0.02 for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). No effects of treatment were observed on temperature of the *M. longissimus dorsi* 30 min after slaughter ($35.6 \pm 0.27^\circ\text{C}$, $35.6 \pm 0.27^\circ\text{C}$ and $36.1 \pm 0.27^\circ\text{C}$ for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$), 3 h after slaughter ($17.5 \pm 0.27^\circ\text{C}$, $17.5 \pm 0.27^\circ\text{C}$ and $17.8 \pm 0.27^\circ\text{C}$ for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$) and 24 h after slaughter ($1.7 \pm 0.07^\circ\text{C}$, $1.7 \pm 0.07^\circ\text{C}$ and $1.6 \pm 0.07^\circ\text{C}$ for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). No effects of treatment were observed on the conformation ($\chi^2 = 0.244$, $P > 0.10$) and the fatness ($\chi^2 = 4.912$, $P > 0.10$) of the carcasses. However, in the "R" conformation category (which represented 22/29, 24/30 and 22/30 of the carcasses for CONT, PERM and RAND, respectively), less fat carcasses (classification = 4) were observed for PERM and RAND lambs compared to CONT carcasses (8/24, 8/22 and 15/22, respectively; $\chi^2 = 6.735$, $P < 0.05$).

3.3. Stress physiology measurements

No effects of treatment were observed on basal plasma cortisol concentration either 1 week (log back-transformed data, 4.7 ± 0.62 ng.mL⁻¹, 4.8 ± 0.63 ng.mL⁻¹ and 4.9 ± 0.64 ng.mL⁻¹, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$) or 6 weeks after the start of voltage exposure (log back-transformed data, 4.4 ± 0.57 ng.mL⁻¹, 5.0 ± 0.65 ng.mL⁻¹ and 5.1 ± 0.67 ng.mL⁻¹, respectively, $P > 0.10$). There was an effect of repetition ($P < 0.01$). No effects of treatment were observed on the difference between mean heart rate the minute before entering the stall and mean rate in the stall (-1 ± 2.9 bpm, -4 ± 3.6 bpm and -6 ± 3.4 bpm, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$) and on the difference between mean heart rate in the stall and mean rate the minute after leaving the stall ($+4 \pm 1.9$ bpm, $+5 \pm 2.1$ bpm and $+7 \pm 2.2$ bpm, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). A trend for a treatment effect ($P = 0.09$) was found for cortisol at slaughter: PERM lambs had a lower plasma cortisol concentration than CONT lambs ($P < 0.05$; Figure 3) while no differences were observed between the other treatments. In addition, a trend for a treatment effect was observed for the weight of the adrenal medulla ($P = 0.08$): PERM lambs had heavier adrenal medullas than CONT lambs ($P < 0.05$; Figure 3) while no differences were observed between the other treatments. There was an effect of repetition ($P < 0.001$). No effects of treatment were observed on TH activity (log back-transformed data, 1.05 ± 0.042 nmol/h/mg, 1.04 ± 0.037 nmol/h/mg and 1.01 ± 0.040 nmol/h/mg, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$) and PNMT activity (square back-transformed data, 0.15 ± 0.013 nmol/h/mg, 0.14 ± 0.011 nmol/h/mg and 0.12 ± 0.011 nmol/h/mg, for CONT, PERM and RAND, respectively, $P > 0.10$). An effect of repetition was found ($P < 0.01$) only for TH activity.

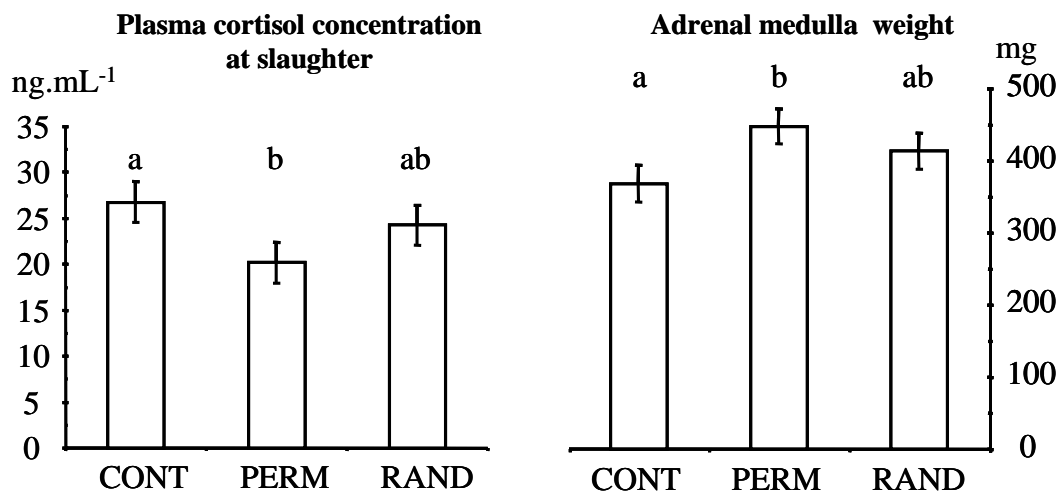


Figure 3. Plasma cortisol concentration (ng.mL⁻¹) and adrenal medulla weight (mg) at slaughter in Romane male lambs submitted to 6 weeks of voltage exposure (3.5 V applied on the water trough) permanently (PERM, n=30), randomly (34h/week, RAND, n=30) or to no voltage exposure (CONT, n=29).

4. Discussion

To our knowledge, no experiments have been performed to study the effects of stray voltage on intensively reared lambs. The feeding, watering and housing conditions of the lambs used in the present experiment were similar to farm conditions.

Production. The lack of effect of voltage exposure on lamb weight, average daily gain and water intake during the fattening period are in agreement with many studies in fattening pigs (Gustafson *et al.*, 1986; Robert *et al.*, 1992; Godcharles *et al.*, 1993). However, daily feed intake and average daily gain were reduced in growing-finishing pigs submitted to 5 V (applied to the feeder and the water trough) compared to control pigs but only in the second half of the experiment (between 14 and 21 weeks of age) (Robert *et al.*, 1991). These results were partly explained by the fact that the electric resistance of pigs is negatively correlated to body weight (Robert *et al.*, 1991). In addition, in growing-finishing pigs, Gustafson *et al.* (1986) showed that a current above 3 mA was needed to affect the duration of drinking and 4 mA to affect water intake. In our experimental conditions, the 3.5 V applied to the water trough generated a current of 2.4 mA (± 0.47 mA) (data collected in a similar experiment conducted with ewe lambs at the same age). This range of current did not affect water intake although we cannot exclude changes in drinking behaviour.

Carcass. No effect of voltage exposure was observed on the pH and the temperature of the *M. longissimus dorsi* 30 min, 3 h and 24 h after slaughter. The only voltage effect on carcass parameters was, in the good conformation class (representing more than 70% of carcasses), a lower number of fat carcasses in lambs submitted to permanent or random voltage exposure compared to control lambs. Considering that, on the one hand, voltage exposure is considered as a stressor and that, on the other hand, cortisol favours the accretion of fat at the expense of protein (Devenport *et al.*, 1989), a higher number of fat carcasses could have been expected in the lambs submitted to voltage compared to the control group. However, the opposite was observed. Two hypotheses may explain this discrepancy. Firstly, the repetition of the stressor over a 6-week period of exposure could have in fact reduced the lamb's reaction to stressor and therefore the release of cortisol. Indeed, chronic stress can decrease the reactivity of adrenal glands (review by Mormède *et al.*, 2007), a larger dose of ACTH being necessary to obtain the release of the same quantity of cortisol. This hypothesis is corroborated by the trend for a reduced cortisol level observed in lambs submitted to permanent voltage compared to control lambs at slaughter. Secondly, the difference in fatness could be partly explained by an effect of stress on lamb metabolism during the fattening period since cortisol has a direct lipolytic action on fat cells (Sapolsky *et al.*, 2000). In addition, an elevated metabolic requirement of the tissues imposed by a prolonged exposure to the stressor could have resulted in a reduction in fat deposition. However, the fact that basal cortisol concentration was not modified by the treatments, either after 1-week of voltage exposure or after 6 weeks, does not really corroborate these two hypotheses.

Ultimate pH of the *M. longissimus dorsi* reflects the level of depletion of muscle glycogen stores and its reduction suggests physical activity ante mortem. A high muscle temperature and/or a low pH within minutes or hours after slaughter are indicators of high activity and/or high stress level in the minutes before slaughter (Terlouw and Rybarczyk, 2008). Ultimate pH and muscle temperature were similar between lambs submitted to voltage and control lambs. It is possible that the stress induced by slaughter (transport, novel environment and handling by unfamiliar people) was large enough to mask a possible effect of a prolonged voltage exposure during fattening on these slaughter parameters. However, as discussed thereafter, the cortisol concentrations measured at slaughter were quite low compared to other studies (Deiss *et al.*, 2009) which showed that the stress previously to slaughter was probably quite low.

Stress physiology. Most of the stress physiology parameters were not modified by the voltage exposure: there was no effect of voltage exposure on heart rate, basal cortisol concentrations, TH and PNMT activities. When lambs entered or left the watering stall, no differences on heart rate were observed between treatments. Several authors (Lefcourt *et al.*, 1985; Gorewit and Scott, 1986; Lefcourt *et al.*, 1986) showed an increase in heart rate (from +3 to +30 bpm) in dairy cows exposed to voltage. However, in these experiments, the current through the body of cows varied from 3.6 to 12.5 mA which was higher than the current obtained in our conditions. Moreover, the lack of difference between treatments on TH and PNMT activities could indicate that the catecholaminergic system was not affected by voltage exposure. This result is supported by two experiments in dairy cows (Lefcourt and Akers, 1982; Lefcourt *et al.*, 1986) which concluded that current exposure (from 2.5 to 12 mA) did not affect plasma catecholamines concentrations.

The higher weight of adrenal medulla in lambs exposed permanently to the stressor could be partly explained by morphological alterations of the adrenals due to stress. Indeed, in pigs, the number of cells in the adrenal medulla is increased after repeated exposure to a noise stressor (Kanitz *et al.*, 2005). Adrenocorticotrophic hormone (ACTH), which is liberated during stress, exerts a trophic action on the adrenal glands, which can result in their hypertrophy, especially in case of prolonged stress, as it was previously observed in rats by Lemaire *et al.* (1993).

Lambs exposed permanently to electricity on the water trough had a lower plasma cortisol concentration at slaughter compared to control lambs. As previously discussed, this lower concentration can result from a functional modification of the adrenals in response to the stressor (review by Mormède *et al.*, 2007). If no functional modification of the HPA axis was involved, a second hypothesis could be the modification of the lamb's evaluation of the environment indicating that lambs submitted to permanent voltage exposure were less stressed at slaughter. It could be reasonable to consider that a prolonged exposure to a stressor (if it is mild and allows the animals to become adapted to it) could help the lamb to better handle a subsequent exposure to another stressor as it was reported in the study of Boissy *et al.* (2001) where repeated changes in the social and physical environment of calves favoured

their adaptation to potential changes in their environment. However, the cortisol concentrations measured at slaughter in our experiment were relatively low compared to the literature and can express the fact that the slaughtering conditions were very good and consequently the stress of the animals was limited. Deiss *et al.* (2009) categorised stress levels in lambs according to their cortisol concentrations at exsanguination. Based on the 12 categories that they identified and using cortisol steps of 5ng/L our lambs would be included in the first 5 categories which means low stress.

Lack of effects. Although voltage exposure had some effects on lamb stress physiology, no major effects were found on production parameters. At least four hypotheses could explain this lack of major effects. 1) The voltage level of 3.5 V was chosen according to the results obtained by Duvaux-Ponter *et al.* (2005) after applying different voltages to a metallic feeder and were adjusted during a preliminary experiment in order to get the same intensity crossing the lambs when the electricity was applied to a water trough. This voltage may have been just high enough to modify stress physiology but not high enough to induce production impairment. 2) It is possible that only the presence of multiple stressors in addition to stray voltage would have induced a negative impact on production performances of lambs. Indeed, the effects of voltage (modified feeding and drinking behaviours, an increase in agonistic interactions and a decrease in rest time) were more pronounced in pigs already facing a stressful situation such as rationing compared to when voltage was applied alone (Robert *et al.*, 1991, 1992). During our experiment, male lambs were housed in good living conditions: enough space, no competition at feeding and no mixing of animals. These conditions allowed the animals to express their full growth potential. Indeed, the average daily gain of our lambs was similar to the average daily gain (321 g/day) measured in Romane male lambs fed *ad libitum* from 32 to 46 kg with concentrate by Berthelot *et al.* (2004). These “comfortable” rearing conditions may in part explain the lack of effects of stray voltage in male lambs. 3) Another hypothesis could be that the lambs modified their behaviour in order to reduce voltage exposure. According to Ohm’s Law, the magnitude of the current (intensity) depends on the voltage level and on the electrical resistance (impedance) of the animal. This resistance is the sum of the resistance of body tissues and of the contact resistance of the animal to the ground and to the electrified trough. It could be hypothesized that the animal, by modifying its response, for example by changing the position of its muzzle in the water trough, could change the resistance of the contact point and thus modify the intensity crossing its body, making the treatment less effective. For example, in dairy cows subjected to voltage on their water trough, Reinemann *et al.* (2005) observed a change in drinking behaviour: cows exerted a pressure on the trough therefore increasing the contact surface muzzle-trough and thus reducing the current density at the level of their muzzle. In our experiment, no fine facial behavioural observations were performed. It would be interesting to study behavioural modifications more thoroughly in a subsequent study. 4) Finally, habituation could also explain part of the lack of effect of voltage exposure. During the first days following an acute

stress response, habituation could subsequently take place. Indeed, several experiments showed that animals become habituated to an electric stressor, for example, after 24 hours of exposure in dairy cows (Gorewit *et al.*, 1985) and after 6 hours of exposure in pigs (Ziecik *et al.*, 1993).

In farm conditions, stray voltage can occur in an unpredictable way (Hultgren, 1990). To mimic the farm conditions, our lambs were randomly exposed to voltage on the water trough. However, on the contrary to our hypothesis that random exposure was at least as detrimental as permanent voltage exposure, the consequences of permanent exposure to electricity were higher than random exposure. Different consequences of unpredictability were found in the literature: an increase in agonistic behaviour in pigs (Carlstead, 1986), a modification of emotional reactivity in sheep (Greiveldinger *et al.*, 2007) and a modification of stress physiology in rodents and primates (review by Levine, 2000). Even if no signal warned the animal of the presence of voltage on the trough, the lambs could have learned to drink at time when voltage was not applied, thus limiting the exposure to the stressor. This could have involved observational learning as already shown in lambs (Veissier and Stefanova, 1993). The lambs could have got information, concerning the presence of voltage, from the lamb which was currently drinking and could have adapted their behaviour by postponing visits to the water trough in case of a sign of stress from a conspecific.

Conclusion

The present study failed to demonstrate an effect of voltage exposure on the water trough on growth and water intake of male lambs. The unpredictability of voltage exposure was not as detrimental as it could have been expected. Nevertheless, some evidence, such as the reduction in the fatness of carcasses, the lower plasma cortisol concentration at slaughter and the increase in adrenal medulla weight, suggest that permanent voltage exposure could induce a modification of the stress physiology of lambs exposed to stray voltage probably indicating a mild chronic stress in these animals.

Acknowledgments

The authors would like to thank L. Cressent and P. Mariat for the care of the animals, F. Fortin and J.P. Gernez (EDF R&D) for the electricity exposure system, M. Carrière for technical assistance, S. Andanson, O. Dhumez and C. Ficheux for their help in data analysis, the slaughterhouse for their cooperation, A. A. Ponter for re-reading the English and RTE for financial support.

References

- Axelrod, J., 1962. Purification and properties of phenylethanolamine-N-methyl transferase. *J. Biol. Chem.* (237) 1657-1660.
- Bassett, L., Buchanan-Smith, H.M., 2007. Effects of predictability on the welfare of captive animals. *Appl. Anim. Behav. Sci.* (102) 223-245.
- Berthelot, V., Poissonnet, P., Saadé, M., Bas, P., 2004. Fatty acid composition of lamb muscle as affected by extruded linseed and type of cereal. In: INRA-Institut de l'Elevage (Eds.), 11èmes Journées Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France, p. 77.
- Boissy, A., Bouissou, M.F., 1994. Effects of androgen treatment on behavioral and physiological responses of heifers to fear-eliciting situations. *Horm. Behav.* (28) 66-83.
- Boissy, A., Veissier, I., Roussel, S., 2001. Behavioural reactivity affected by chronic stress: An experimental approach in calves submitted to environmental instability. *Anim. welf.* (10) S175-S185.
- Broom, D.M., Johnson, K.G., 1993. *Stress and Animal Welfare*, Chapman & Hall, London.
- Carlstead, K., 1986. Predictability of feeding: Its effect on agonistic behaviour and growth in grower pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* (16) 25-38.
- Commission Regulation (EEC) No 461/93, 1993 of 26 February laying down detailed rules for the Community scale for the classification of carcasses of ovine animals.
- Deiss, V., Temple, D., Ligout, S., Racine, C., Bouix, J., Terlouw, C., Boissy, A., 2009. Can emotional reactivity predict stress responses at slaughter in sheep? *Appl. Anim. Behav. Sci.* (119) 193-202.
- Deschamps, F., 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bull. Soc. Vet. Prat. France* (86) 174-181.
- Désiré, L., Boissy, A., Veissier, I., 2002. Emotions in farm animals: a new approach to animal welfare in applied ethology. *Behav. Proc.* (60) 165-180.
- Devenport, L., Knehans, A., Sundstrom, A., Thomas, T., 1989. Corticosterone's dual metabolic actions. *Life Sci.* (45) 1389-1396.
- Duvaux-Ponter, C., Roussel, S., Deschamps, F., 2005. Determination of a stray voltage threshold leading to aversion in sheep. In: Kusunose, R., Sato, S. (Eds.), *Proceedings of the 39th International Congress of the International Society for Applied Ethology*, Sagamihara (Japon), p. 130.
- Godcharles, L., Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1993. Transient stray voltage: Is it detrimental to growth performance, health status and welfare of market pigs? *Vet. Res. Commun.* (17) 41-53.
- Gorewit, R.C., Scott, N.R., 1986. Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* (69) 1122-1127.

- Gorewit, R.C., Scott, N.R., Czarniecki, C.S., 1985. Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *J. Dairy Sci.* (68) 718-725.
- Greiveldinger, L., Veissier, I., Boissy, A., 2007. Emotional experience in sheep: Predictability of a sudden event lowers subsequent emotional responses. *Physiol Behav* (92) 675-683.
- Gustafson, R.J., 2003. Stray voltage overview. Stray voltage and dairy farms. NRAES, Radisson Pen Harris Hotel and Convention Center Camp Hill, Pennsylvania, pp. 3-11.
- Gustafson, R.J., Appleman, R.D., Brennan, T.M., 1986. Electrical current sensitivity of growing/finishing swine for drinking. *Trans. ASAE* (29) 592-596,600.
- Hopster, H., Blokhuis, H.J., 1994. Validation of a heart-rate monitor for measuring a stress response in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* (74) 465-474.
- Hultgren, J., 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet. Res. Commun.* (14) 287-298.
- Kanitz, E., Otten, W., Tuchscherer, M., 2005. Central and peripheral effects of repeated noise stress on hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis in pigs. *Livest. Prod. Sci.* (94) 213-224.
- Karnoven, J., Chwalbinka-Moneta, J., Saynajakangas, S., 1984. Comparison of heart rate measured by ECG and microcomputer. *Physician Sportmed* (12) 65-69.
- Lefcourt, A.M., Akers, R.M., 1982. Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *J. Dairy Sci.* (65) 2125-2130.
- Lefcourt, A.M., Akers, R.M., Miller, R.H., Weinland, B., 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *J. Dairy Sci.* (68) 391-401.
- Lefcourt, A.M., Kahl, S., Akers, R.M., 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *J. Dairy Sci.* (69) 833-842.
- Lemaire, V., Le Moal, M., Mormede, P., 1993. Regulation of catecholamine-synthesizing enzymes in adrenals of Wistar rats under chronic stress. *Am. j. physiol., Regul. integr. comp. physiol.* (264) R957-962.
- Levine, S., 2000. Influence of psychological variables on the activity of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis. *Eur. J. Pharmacol.* (405) 149-160.
- Mormède, P., Andanson, S., Auperin, B., Beerda, B., Guemene, D., Malmkvist, J., Manteca, X., Manteuffel, G., Prunet, P., van Reenen, C.G., Richard, S., Veissier, I., 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol Behav* (92) 317-339.
- Norell, R.J., Gustafson, R.J., Appleman, R.D., Overmier, J.B., 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. ASAE* (26) 1506-1511.

- Parrott, R.F., Misson, B.H., De la Riva, C.F., 1994. Differential stressor effects on the concentration of cortisol, prolactin and catecholamines in the blood of sheep. *Res. Vet. Sci.* (56) 234-239.
- Quirce, C.M., Odio, M., Solano, J.M., 1981. The effects of predictable and unpredictable schedules of physical restraint upon rats. *Life Sci.* (28) 1897-1902.
- Reinemann, D.J., Stetson, L.E., Laughlin, N.E., LeMire, S.D., 2005. Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Trans. ASAE* (48) 385-392.
- Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1991. Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Can. J. Vet. Res.* (55) 371-376.
- Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1992. Stray voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Can. J. Anim. Sci.* (72) 467-475.
- Roussel, S., Hemsworth, P.H., Boissy, A., Duvaux-Ponter, C., 2004. Effects of repeated stress during pregnancy in ewes on the behavioural and physiological responses to stressful events and birth weight of their offspring. *Appl. Anim. Behav. Sci.* (85) 259-276.
- Sapolsky, R.M., Romero, L.M., Munck, A.U., 2000. How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocr. Rev.* (21) 55-89.
- Terlouw, E.M.C., Rybarczyk, P., 2008. Explaining and predicting differences in meat quality through stress reactions at slaughter: The case of Large White and Duroc pigs. *Meat Sci.* (79) 795-805.
- Veissier, I., Stefanova, I., 1993. Learning to suckle from an artificial teat within groups of lambs: Influence of a knowledgeable partner. *Behav. Proc.* (30) 75-82.
- Veissier, I., Boissy, A., de Passille, A.M., Rushen, J., van Reenen, C.G., Roussel, S., Andanson, S., Pradel, P., 2001. Calves' responses to repeated social regrouping and relocation. *J. Anim. Sci.* (79) 2580-2593.
- Waymire, J.C., Bjur, R., Weiner, N., 1971. Assay of tyrosine hydroxylase by coupled decarboxylation of dopa formed from 1-14C-L-tyrosine. *Anal. Biochem.* (43) 588-600.
- Ziecik, A.J., España, F., Garcia Casado, P., 1993. Effect of electrical stress stimuli on luteinizing hormone, prolactin and cortisol secretion in pigs. *Investig. agrar., Prod. sanid. anim.* (8) 269-280.

Chapitre 2 - Effets des courants électriques chez les ovins

Partie 2

- 2. Est-ce que l'expérience passée d'un agent stressant permet à une agnelle de gérer plus efficacement une situation stressante ?**

Est-ce que l'expérience passée d'un agent stressant permet à une agnelle de gérer plus efficacement une situation stressante ?

Préambule

Cette partie est un approfondissement de l'étude des effets des courants parasites sur la réactivité émotionnelle des agnelles (annexe 2). Cette expérimentation complémentaire a été réalisée à la suite de la deuxième répétition de l'expérimentation sur les agnelles et les premiers résultats ont été présentés au cours de la 31^{ème} Conférence Internationale d'Ethologie (19-24 août 2009, Rennes, France) (annexe 5).

1. Introduction

Les processus cognitifs sont à l'origine des émotions. Cependant les émotions peuvent en retour influencer les processus cognitifs. De nombreux travaux en psychologie humaine montrent combien le vécu émotionnel peut modifier la manière dont l'individu traite les informations provenant de son environnement (Boissy *et al.* 2007). Cela concerne à la fois des altérations de l'attention, de la mémoire ainsi que du jugement porté sur la situation. L'anxiété induit une attention excessive pour les informations menaçantes (Bradley *et al.* 1997). Ainsi, des sujets ayant été exposés à des événements à forte valence négative tendent à interpréter négativement tout nouvel événement ambigu (Wright et Bower 1992). De plus, les événements chargés émotionnellement sont plus facilement mémorisés que des événements neutres (Reisberg et Heuer 1995). De telles modifications cognitives consécutives à une émotion existent chez l'animal (Paul *et al.* 2005). Ainsi, des génisses fortement stressées sont incapables d'abandonner un comportement préalablement appris alors qu'il n'est plus récompensé, ce qui les empêche d'acquérir un nouveau comportement plus approprié à la situation (Lensink *et al.* 2006). Par ailleurs, il a été montré chez la souris que l'expérience passée, et notamment une expérience stressante, peut à long terme influencer la réactivité émotionnelle (Adamec *et al.* 2004) et diminuer les capacités cognitives (El Hage *et al.* 2006). Les objectifs de cette expérimentation ont été i) de déterminer les conséquences de l'exposition prolongée à un agent stressant (expérience passée) sur la motivation des agnelles à ingérer du concentré ou boire dans une situation de test, ii) d'évaluer la modification éventuelle de la réactivité émotionnelle en présence d'un dispositif potentiellement chargé négativement.

2. Matériel et méthodes

2.1 Animaux, traitements et dispositif expérimental

Quarante-cinq agnelles de race Romane (ex INRA 401) ont été réparties en trois groupes selon leur âge ($94 \pm 6,9$ jours), leur poids vif ($30,4 \pm 3,12$ kg) et la taille de leur fratrie ($2,6 \pm 0,72$ agneaux). Les agnelles ont été logées par groupes de 15 animaux du même traitement dans trois enclos identiques ($3,5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, largeur (l) \times longueur (L)) contenant une stalle d'abreuvement ($0,4 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$, l \times L \times h), une auge pour le concentré ($0,3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$, l \times L) et un râtelier ($0,6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, l \times L) pour la paille. Chaque groupe d'agnelles a été soumis à l'application d'une tension électrique de 3,5 V au niveau de l'abreuvoir soit de manière permanente (PERM, n = 15), soit aléatoirement 34 heures par semaine avec des durées variant de 4 à 16 heures (RAND, n = 15). Le groupe témoin n'était pas soumis à des tensions électriques (CONT, n = 15). La 8^{ème} semaine d'exposition, les agnelles ont été testées individuellement pendant quatre jours au cours de quatre épreuves. Une case de départ ($0,6 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$, l \times L) avec une porte à guillotine permettait l'accès à l'enclos de test ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1,7 \text{ m}$, l \times L \times h), qui comprenait un plus petit enclos aux parois ajourées ($1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$) contenant 3 congénères familiers.

2.2 Habituation

Les agnelles ont été habituées aux seaux utilisés lors des épreuves comportementales et contenant les renforcements (concentré ou eau). Le seau rempli d'eau a été placé deux fois 20 minutes dans l'enclos d'élevage pendant 4 jours avant le début des épreuves. Le seau contenant du concentré était identique au seau servant à la distribution du concentré de la ration deux fois par jour. Les animaux ont été habitués à l'enclos de test pendant 6 jours, par petits groupes de 7 à 8 individus puis, individuellement, avec une ceinture cardiaque.

2.3 Procédure expérimentale

Une ceinture cardiaque était positionnée sur l'agnelle 3 minutes avant le début de l'épreuve. Après avoir restreint l'agnelle pendant 15 secondes dans la case de départ, la porte guillotine s'ouvrait, donnant accès à l'enclos de test. Le test durait 3 minutes. Les agnelles ont été confrontées à quatre épreuves suivant un dispositif en carré latin : chaque agnelle recevait comme renforcement soit le concentré, soit l'eau et ce renforcement était localisé soit sur le sol, soit dans une réplique de la stalle d'abreuvement. La position de la stalle et du seau contenant le renforcement était alternée dans l'enclos de test pour la moitié des individus de chaque traitement.

Les variables suivantes ont été mesurées : la quantité de renforcement (concentré ou eau) consommée, le nombre de vocalisations, la latence pour rejoindre le renforcement ainsi que le

rythme cardiaque moyen. Lors de la période d'élevage, les consommations de concentré et d'eau étaient enregistrées par lot.

2.4 Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant la procédure MIXED du logiciel SAS[®] (Statistical Analysis System software, version 9.1.3). Le modèle utilisé a été le suivant :

$$Y_{ijklm} = \mu + T_j + R_k + L_l + J_m + T_j * R_k + R_k * L_l + T_j * R_k * L_l + H_i + PV_i + e_{ijklm}$$

où μ représente la moyenne générale, T_j l'effet fixe du traitement avec 3 modalités (CONT, PERM et RAND) ; R_k l'effet fixe du renforcement avec 2 modalités (concentré ou eau) ; L_l l'effet fixe de la localisation du renforcement avec 2 modalités (sur le sol ou dans la réplique de la stalle d'abreuvement) ; J_m l'effet fixe du jour de test (4 jours de tests) ; $T_j * R_k$ l'effet fixe de l'interaction entre le traitement et le renforcement ; $R_k * L_l$ l'effet fixe de l'interaction entre le renforcement et la localisation du renforcement ; $T_j * R_k * L_l$ l'interaction entre le traitement et le renforcement et la localisation du renforcement ; H_i l'effet répété de l'individu ; PV_i le poids vif de l'animal en tant que covariable et e_{ijklm} l'erreur résiduelle.

3. Résultats

Lors de la période d'élevage de 7 semaines précédant les tests, aucune différence entre les traitements n'a été observée concernant la consommation d'eau et de concentré.

Aucune interaction entre le traitement et la présence de la stalle lors du test n'a été observée sur le nombre de vocalisations (figure 1) ni sur la latence pour rejoindre le renforcement. De plus, aucune différence entre les traitements n'a été observée sur le rythme cardiaque moyen lors des tests.

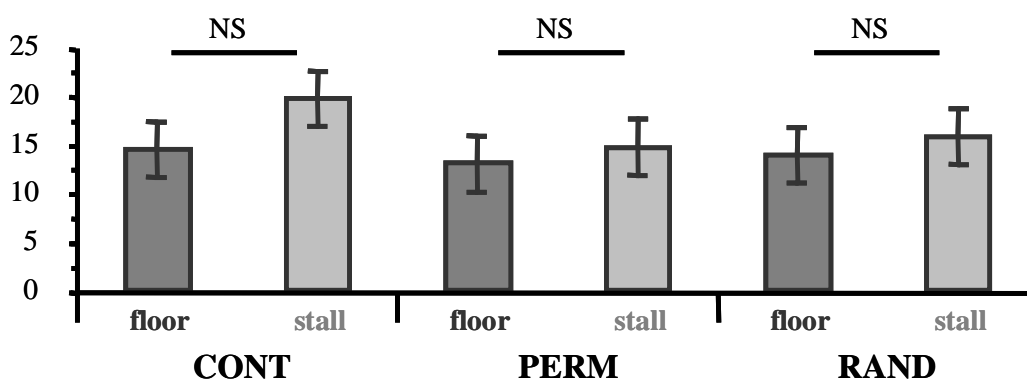


Figure 1. Nombre de vocalisations durant un test de motivation de 3 minutes émises par des agnelles soumises pendant 8 semaines à une tension électrique de 3,5 V au niveau de leur abreuvoir soit de manière permanente (PERM, n=15) soit de manière aléatoire (34h/semaine, RAND, n=15) ou à aucune tension (CONT, n=15). Le renforcement (eau ou concentré) était placé sur le sol (floor) ou dans la réplique de la stalle d'abreuvement (stall). NS : non significatif, $P > 0,10$.

Les agnelles exposées à l'agent stressant (de manière permanente ou aléatoire) ont ingéré une quantité plus importante de concentré que les agnelles témoins pendant les tests (figure 2). Les agnelles exposées de manière aléatoire à l'agent stressant ont été plus rapides que les agnelles témoins à rejoindre le renforcement, quel que soit celui-ci (figure 3).

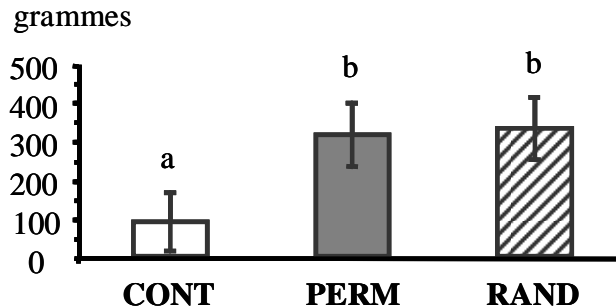


Figure 2. Quantité de concentré ingérée (grammes) durant un test de motivation de 3 minutes chez des agnelles soumises pendant 8 semaines à une tension électrique de 3,5 V au niveau de leur abreuvoir soit de manière permanente (PERM, n=15) soit de manière aléatoire (34h/semaine, RAND, n=15) ou à aucune tension (CONT, n=15). a et b diffèrent, $P < 0,05$.

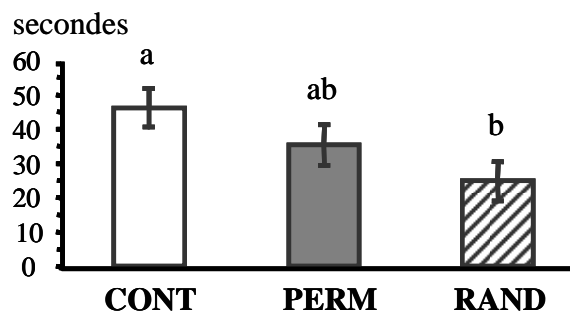


Figure 3. Latence (secondes) pour rejoindre le seau de renforcement (eau ou concentré) durant un test de motivation de 3 minutes chez des agnelles soumises pendant 8 semaines à une tension électrique de 3,5 V au niveau de leur abreuvoir soit de manière permanente (PERM, n=15) soit de manière aléatoire (34h/semaine, RAND, n=15) ou à aucune tension (CONT, n=15). a et b diffèrent, $P < 0,05$.

4. Discussion et conclusion

La stalle d'abreuvement dans laquelle les agnelles ont été exposées à l'agent stressant pendant la phase d'élevage ne semble pas avoir été perçue négativement durant la situation de test. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette absence de différence. i) l'abreuvoir plutôt que la stalle aurait été perçue négativement pendant les 8 semaines d'exposition à la tension ii) l'endroit dans l'enclos d'élevage plus que la stalle d'abreuvement elle-même pourrait avoir une valence négative sur le plan des émotions iii) les animaux se seraient habitués à l'agent stressant pendant les 8 semaines d'exposition, et la stalle d'abreuvement pourrait avoir perdu sa valence négative. Les résultats de Passillé *et al.* (1996) appuieraient en particulier la deuxième hypothèse : des veaux ont été manipulés de manière aversive dans un environnement nouveau. Pour certains veaux, les réponses de peur observées en présence du manipulateur dans l'enclos de test n'ont plus été observées lorsque ce même manipulateur

s'est placé dans l'enclos d'élevage. Une expérience négative peut donc être liée à un endroit particulier, plus qu'à l'agent stressant lui-même.

Les agnelles exposées de manière aléatoire à l'agent stressant ont été plus rapides à rejoindre le renforcement et ont été plus motivées à ingérer du concentré ou de l'eau pendant les tests que les agnelles témoins. Or, aucune différence d'ingestion de concentré ou de consommation d'eau n'a été observée pendant la période d'élevage. Les agnelles ayant l'expérience d'un agent stressant modéré et imprévisible semblent donc mieux gérer une situation inhabituelle de test que les animaux témoins. Ainsi, un stress modéré durant la période d'élevage pourrait faciliter l'adaptation ultérieure de l'animal à une situation nouvelle de challenge, comme cela a été suggéré par Mendl (1999). Cependant, ces résultats restent à confirmer.

5. Références

- Adamec R., Walling S., Burton P., 2004. Long-lasting, selective, anxiogenic effects of feline predator stress in mice. *Physiology & Behavior*, 83, 401-410.
- Boissy A., Arnould C., Chaillou E., Colson V., Desire L., Duvaux-Ponter C., Greiveldinger L., Leterrier C., Richard S., Roussel S., Saint-Dizier H., Meunier-Salaün M.C., Valance D., 2007. Emotions et cognition : stratégie pour répondre à la question de la sensibilité des animaux. *INRA Productions Animales*, 20, 17-21.
- Bradley B.P., Mogg K., Lee S.C., 1997. Attentional biases for negative information in induced and naturally occurring dysphoria. *Behaviour Research and Therapy*, 35, 911-927.
- de Passillé A.M., Rushen J., Ladewig J., Petherick C., 1996. Dairy calves' discrimination of people based on previous handling. *Journal of Animal Science*, 74, 969-974.
- El Hage W., Griebel G., Belzung C., 2006. Long-term impaired memory following predatory stress in mice. *Physiology & Behavior*, 87, 45-50.
- Lensink J., Veissier I., Boissy A., 2006. Enhancement of performances in a learning task in suckler calves after weaning and relocation: motivational versus cognitive control? A pilot study. *Applied Animal Behaviour Science*, 100, 171-181.
- Mendl M., 1999. Performing under pressure: stress and cognitive function. *Applied Animal Behaviour Science*, 65, 221-244.
- Paul E.S., Harding E.J., Mendl M., 2005. Measuring emotional processes in animals: the utility of a cognitive approach. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 29, 469-491.
- Reisberg D., Heuer F. 1995. Emotion's multiple effects on memory. In "Brain and memory: modulation and mediation of neuroplasticity. " (J.L. McGaugh, N.M. Weiberger and G. Lynch, eds.), pp. 84-92. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Wright W.F., Bower G.H., 1992. Mood effects on subjective probability assessment. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 52, 276-291.

Chapitre 3 - Effets des courants électriques chez les bovins

Préambule

De nombreux travaux ont été réalisés concernant les effets des courants électriques parasites chez les bovins (chapitre 1). Nos travaux se démarquent de la littérature par une approche originale à deux niveaux. Tout d'abord les tensions électriques ont été appliquées en condition d'élevage sur les vaches de la ferme expérimentale de Grignon, de manière contrôlée, et leurs effets ont été étudiés à moyen terme. De plus, l'imprévisibilité, qui est une composante des courants parasites fréquemment rencontrée en élevage, a été prise en considération dans les dispositifs expérimentaux.

L'étude des effets des tensions s'est déroulée en deux étapes. Une expérimentation à court terme chez les génisses a permis de déterminer le seuil de réaction persistante. Puis, une expérimentation à moyen terme chez les vaches laitières a été conduite en s'appuyant sur une partie des résultats obtenus à court terme.

1. Expérimentation à court terme sur les génisses

1.1 Objectifs

L'objectif de cette double expérimentation a été de déterminer, à court terme, le seuil de réaction de génisses à une tension électrique appliquée au niveau de la mangeoire. Ensuite, nous avons étudié les effets de l'expérience et de l'imprévisibilité de la tension électrique sur les réponses comportementales et physiologiques des génisses précédemment utilisées.

1.2 Méthodes

Expérimentation 1. Pendant une période de 4 semaines, 40 génisses Holstein (âgées de 5 à 10 mois) ont été entraînées à ingérer du concentré dans deux mangeoires métalliques situées à l'extrémité d'un couloir de 5 mètres et au-dessus d'une plaque métallique. Pour 20 génisses (VOLT), une tension électrique a été appliquée, pendant les 2 minutes du test, sur la mangeoire dans laquelle la génisse avait commencé à manger. Ceci laissait la possibilité à la génisse de changer de mangeoire pour aller ingérer du concentré dans la mangeoire non-électrifiée, si elle le souhaitait. La tension a été augmentée quotidiennement de 0,3 V en 0,3 V, de 0 V jusqu'à 5 V. Les 20 génisses restantes (CONT) ont servi de témoins en suivant la même procédure que les génisses VOLT mais sans application d'électricité.

Expérimentation 2. Après un intervalle de 2 semaines sans manipulation, une période de ré-habitation au dispositif de 4 semaines a été réalisée sans électricité. Puis, une tension de 3,3 V a été appliquée, pendant les 2 minutes du test, sur la mangeoire dans laquelle la génisse avait commencé à manger soit de manière permanente durant 11 jours consécutifs (PERM), soit de manière aléatoire 4 jours sur 11 (RAND). Les 40 génisses précédemment utilisées ont été réparties dans 4 groupes : les génisses VOLT ont reçu soit une application permanente d'électricité (VOLT-PERM, n=10), soit une application aléatoire d'électricité (VOLT-RAND, n=10) et les génisses CONT ont reçu soit une application permanente d'électricité (CONT-PERM, n=10), soit application aléatoire d'électricité (CONT-RAND, n=10).

Lors des deux expériences la latéralisation, le comportement alimentaire, les mouvements brusques et les léchages de museau ont été mesurés. La concentration plasmatique en cortisol a été mesurée 15 minutes après le début du test, à 1 V, 3 V et 5 V pour l'expérimentation 1, et le 1er et 10ème jour de test lors de l'expérimentation 2.

1.3 Résultats

Expérimentation 1. Pour des tensions électriques supérieures ou égales à 2,3 V, les génisses VOLT ont changé plus rapidement de mangeoire pour aller manger dans la mangeoire non électrifiée ; la contribution de la mangeoire électrifiée à la quantité totale ingérée et le temps passé à ingérer dans la mangeoire électrifiée ont diminué. Au dessus de 2 V, plus de génisses VOLT ont réalisé de léchages de museau et de mouvements brusques que de génisses CONT. A 1 V, la concentration plasmatique en cortisol des génisses VOLT a été plus importante que celle des génisses CONT. Vingt-deux génisses ont présenté une forte latéralisation pendant l'ensemble de l'expérimentation. Ces dernières ont passé plus de temps à ingérer dans la mangeoire électrifiée, ont ingéré plus dans la mangeoire électrifiée et ont mis plus de temps à changer de mangeoire que les génisses moyennement ou pas latéralisées.

Expérimentation 2. Les génisses RAND ont eu tendance à passer plus de temps à ingérer du concentré dans la mangeoire électrifiée que les génisses PERM. Plus de génisses RAND ont réalisé des mouvements brusques et des léchages de museau que de génisses PERM. Le premier jour où l'électricité a été appliquée, bien qu'aucune différence de comportement n'ait été observée, la concentration plasmatique en cortisol des génisses CONT était plus élevée que celle des génisses VOLT. Une interaction a été observée entre l'expérience passée et l'imprévisibilité : les génisses CONT-PERM ont ingéré une plus grande quantité de concentré durant le test et ont changé de mangeoire plus rapidement que les génisses CONT-RAND, les génisses VOLT-PERM et VOLT-RAND ayant un comportement intermédiaire.

1.4 Discussion et conclusion

Une tension de 2,3 V (2,6 mA) semble être le seuil de réaction persistante auquel des comportements d'évitement apparaissent pour un nombre important de génisses.

A 1 V (1,3 mA), la réponse physiologique ainsi que l'observation des courbes individuelles (annexe 7) semble indiquer que certaines génisses ont perçu le stimulus électrique, cette valeur correspondant à un seuil de réaction transitoire. Ce seuil de réaction transitoire pourrait résulter de la détection de la nouveauté du stimulus électrique. Cependant, une grande variabilité de réponse entre individus a été observée. La latéralisation des animaux est un paramètre pouvant expliquer une partie de cette variabilité individuelle. En effet, les génisses présentant une très forte latéralisation ont été plus réticentes à changer de mangeoire conduisant ainsi probablement à une surestimation du seuil de réaction des génisses.

Les génisses exposées à la tension électrique de manière imprévisible ont eu plus de difficultés à s'adapter à la situation par rapport aux génisses exposées au même agent stressant mais appliqué de manière prévisible. De plus, l'expérience passée peut moduler la réponse à la tension électrique et semble réduire les effets négatifs la première fois où celle-ci est de nouveau appliquée.

1.5 Préparation de l'expérimentation à moyen terme

Afin de déterminer le niveau de tension à appliquer sur l'abreuvoir pendant l'expérimentation à moyen terme effectuée chez les vaches laitières, une pré-expérimentation a été réalisée avec la même méthodologie mais en utilisant un abreuvoir et de l'eau au lieu d'une mangeoire contenant du concentré. L'objectif de cette pré-expérimentation a été de déterminer la tension à appliquer à un abreuvoir pour obtenir, d'une part, une intensité similaire à celle mesurée sur les animaux dans le test avec les mangeoires et, d'autre part, les mêmes réponses comportementales d'évitement. Suite à cette pré-expérimentation, il a été décidé d'appliquer une tension de 1,8 V.

2. Expérimentation à moyen terme sur les vaches laitières

2.1 Objectifs

L'objectif de cette expérimentation a été de déterminer les effets à moyen terme d'une exposition en permanence ou aléatoire à une tension électrique au niveau de l'abreuvoir sur le comportement, la physiologie du stress et les performances zootechniques de vaches laitières. Les réponses de stress aigu et stress chronique ont été évaluées, ainsi que la modification de la réactivité émotionnelle des animaux.

2.2 Méthodes

L'expérimentation a été conduite sur deux périodes avec 74 vaches de race Prim'Holstein réparties en trois traitements selon le rang et le stade de lactation ainsi que le niveau de production. Tous les animaux ont été logés sur la même aire paillée et l'accès aux abreuvoirs était contrôlé par un système d'identification individuelle électronique. Après 6 semaines d'apprentissage et d'habituation au dispositif expérimental, une tension de 1,8 V (courant alternatif, 50 Hz) a été appliquée à l'abreuvoir pendant 8 semaines, soit de manière permanente (PERM, n=23), soit de manière aléatoire 36 heures/semaine (RAND, n=25). Les animaux restants n'ont reçu aucune tension (CONT, n=26). Des mesures comportementales (comportement de buvée, rythme d'activité), physiologiques (fréquence cardiaque, concentration en cortisol du plasma et du lait, test à l'ACTH) et zootechniques (quantité d'eau bue, production et composition du lait) ont été réalisées le 1^{er} et 3^{ème} jour de la 1^{ère} semaine ainsi que la 2^{ème}, 4^{ème} et 8^{ème} semaine. La réactivité émotionnelle des vaches a été évaluée la 6^{ème} semaine lors de tests de motivation à aller boire et d'objet nouveau.

2.3 Résultats

Le 1^{er} jour de la 1^{ère} semaine d'exposition à la tension électrique, les vaches PERM et RAND ont visité leurs abreuvoirs plus souvent, ont moins bu par visite et ont eu une fréquence cardiaque moyenne par jour plus élevée que les vaches CONT. Les vaches PERM ont effectué plus de visites dans les stalles des autres traitements (abreuvoirs non accessibles), ont mis plus de temps à aller boire une fois entrées dans la stalle, et ont eu un niveau d'activité dans l'enclos d'élevage plus important que les vaches CONT à 10h00, 12h00 et 19h00.

Le 3^{ème} jour de la 1^{ère} semaine, les vaches PERM et RAND ont eu tendance à effectuer plus de visites à l'abreuvoir et les vaches RAND ont moins bu par visite que les vaches CONT.

La 2^{ème} semaine, les vaches RAND ont moins bu à chaque visite et ont eu une concentration plasmatique en cortisol plus importante que les vaches CONT. Les vaches PERM ont réalisé un nombre plus important de visites dans les stalles des autres traitements que les vaches CONT.

La 8^{ème} semaine, les vaches PERM et RAND ont été plus rapides à aller boire après l'entrée dans la stalle que les vaches CONT. Les vaches RAND ont eu un niveau d'activité dans l'enclos d'élevage plus important à 12h00 et entre 19h00 et 21h00, une fréquence cardiaque lors de la buvée et une concentration en cortisol du lait plus importantes, et ont moins bu par visite, par rapport aux vaches CONT.

Dès le 1^{er} jour et pendant les 8 semaines d'exposition à la tension électrique, un nombre moins important de visites avec lapement a été observé pour les vaches PERM et RAND par rapport aux vaches CONT. Un nombre plus important de visites avec flairage de l'abreuvoir a été observé pendant les deux premières semaines pour les vaches PERM et RAND. Seules les vaches RAND ont continué à réaliser un nombre de visites avec flairage plus important que les vaches CONT la 8^{ème} semaine.

Au cours des 8 semaines d'expérimentation, aucune différence entre les traitements n'a été observée sur la quantité de lait produite et sa composition (TB, TP, comptage cellulaire), hormis une diminution transitoire de la production laitière des vaches PERM, entre le 1^{er} et 2^{ème} jour, et des vaches RAND, entre le 2^{ème} et 3^{ème} jour d'application de la tension.

Les vaches RAND ont eu un comportement différent lorsque l'abreuvoir était mis sous tension par rapport aux périodes où l'abreuvoir n'était pas sous tension. En présence de la tension électrique, elles ont mis plus de temps à aller boire une fois entrées dans la stalle le 1^{er} jour, elles ont eu tendance à boire une quantité moins importante par visite le 3^{ème} jour et, elles ont passé plus de temps à boire la 8^{ème} semaine.

Durant le test de motivation, les vaches PERM et RAND ont passé plus de temps à boire que les vaches CONT. Durant le test d'objet nouveau, les vaches PERM et RAND ont été plus rapides à boire que les vaches CONT. De plus les vaches PERM ont été plus rapides à interagir avec l'objet alors que les vaches RAND ont réalisé moins d'interactions avec l'objet que les vaches CONT.

2.4 Discussion et conclusion

Les réponses comportementales et physiologiques enregistrées les premiers jours d'exposition, de manière permanente ou imprévisible, suite à l'application d'une tension électrique de 1,8 V au niveau de l'abreuvoir semblent indiquer un stress aigu transitoire chez les vaches. Les vaches exposées en permanence semblent s'être habituées à la tension électrique. A partir de la 2^{ème} semaine, plus aucune réponse physiologique de stress n'a été observée. Les modifications comportementales ayant eu lieu la 1^{ère} semaine ne sont plus observées, à l'exception des comportements comme le lapement.

Par contre, les vaches exposées de manière imprévisible à la tension électrique ne se sont probablement pas habituées. En effet, des réponses physiologiques de stress et des

modifications du comportement (modification du rythme d'activité et du comportement à l'abreuvoir) sont toujours présentes après 8 semaines d'exposition.

Les résultats du premier test de motivation indiquent que la motivation à aller boire ne diffère pas entre les vaches exposées à la tension électrique de manière permanente ou aléatoire et les vaches témoins. La présence d'un objet nouveau au niveau de l'entrée de la stalle d'abreuvement s'est traduite par un comportement exploratoire plus important et une réactivité moins importante chez les vaches exposées en permanence à la tension électrique par rapport aux vaches témoins. Par contre, l'exposition de manière imprévisible à la tension électrique semble diminuer le comportement exploratoire de la vache. Il est possible que l'exposition à moyen terme à un agent stressant modéré (1,8 V appliqué en permanence sur l'abreuvoir) puisse permettre aux vaches de mieux supporter une situation ultérieure modérément stressante.

L'exposition, à moyen terme, à une tension électrique appliquée en permanence ne semble pas provoquer une réponse de stress chronique chez la vache contrairement à une exposition imprévisible qui pourrait induire un stress chronique modéré. L'exposition à une tension électrique de faible niveau (1,8 V) n'entraîne pas de diminution à moyen terme de la production laitière. En élevage, les tensions électriques parasites de faible niveau (< 2 V), peuvent donc être considérées comme un **agent stressant modéré** à la différence d'autres agents stressants qualifiés de sévères comme le stress thermique ou les ré-allotements répétés qui ont pour effet une diminution à moyen terme des performances de production.

Chapitre 3 - Effets des courants électriques chez les bovins

Partie 1

1. Determination of a stray voltage threshold in Holstein heifers, influence of predictability and past-experience on behavioural and physiological responses

*Détermination du seuil de réaction aux tensions électriques, influence de la prévisibilité et de l'expérience passée sur les réponses comportementales et physiologiques de génisses Holstein
Animal Welfare (soumis pour publication, en révision)*

Determination of a stray voltage threshold in Holstein heifers, influence of predictability and past-experience on behavioural and physiological responses

Karim Rigalma ^{(1)*}, Christine Duvaux-Ponter ^(1,2), Andreia Oliveira ⁽¹⁾, Olivier Martin ⁽²⁾, Thomas Louyot ⁽³⁾,

François Deschamps ⁽³⁾ and Sabine Roussel ^(1,2)

⁽¹⁾ AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽²⁾ INRA UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽³⁾ Réseau de Transport d'Electricité, 34 rue Henri Regnault, 92400 Courbevoie, France

* Corresponding author

Tel.: 33 (0) 1 44 08 18 12; Fax: 33 (0) 1 44 08 17 52; E-mail address: rigalma@agroparistech.fr

Running title: stray voltage threshold in heifers

Abstract

Stray voltage (<10V) may impair animal welfare. Our objectives were 1) to determine the threshold at which heifers react to voltage and 2) to investigate effects of past-experience and random applications of voltage.

Firstly, forty heifers were trained to eat from two metallic feeders at the end of a test-corridor. For 20 heifers voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, 0 to 5V) to the feeder (F1) in which the heifer started to eat (VOLT). Heifers could change to the non-electrified feeder (F2) if they wanted to. Twenty heifers (CONT) followed the same procedure without voltage exposure. For voltages $\geq 2.3V$, percentage of feed eaten from F1 (%FeedF1) was lower, time spent eating in F1 and latency to change to F2 were shorter compared to 0V ($P < 0.01$). At 2V and above, more VOLT than CONT heifers performed muzzle-licking and abrupt head movements ($P < 0.01$).

Secondly, after 4wk, the same heifers were exposed to 3.3V for either 11 consecutive days (DAILY, $n = 20$) or randomly on 4/11 days (RAND, $n = 20$). CONT heifers had higher cortisol concentrations than VOLT heifers on the first day of test ($P < 0.05$). %FeedF1 was higher for RAND than DAILY heifers ($P = 0.05$).

The threshold at which avoidance behaviour started appeared to be 2.3V in our experimental conditions. Adaptation was more difficult with unpredictable rather than predictable voltage and past-experience seemed to reduce the effects of subsequent exposure.

Keywords: animal welfare; cattle; past-experience; stray voltage; stress; unpredictability

Introduction

Electricity is essential to modern farming techniques and several electrically powered machines are used such as milking machines, heated water bowls... Leakage of current from this type of equipment, electric and magnetic induction, faulty connections between the electrical circuit and the earth can lead to the undesirable electrical phenomenon called stray voltage (review by Deschamps 2002). Stray voltage, usually less than 10V, can produce a low current flowing through farm animals (review by Hultgren 1990). According to Ohm's Law, the current depends on the voltage level and the electrical resistance of the animal. The electrical resistance is the sum of the resistance of body tissues and of the contact resistance of the animal to the ground and to the electrified element. Although some effects of stray voltage have been reported on health, behaviour and production parameters in dairy cattle field studies (Salisbury & Williams 1967; Wilson *et al* 1996), in controlled studies, only behavioural modifications were confirmed, but not health and production effects. Indeed, using either electrodes to apply a current in dairy cows, from the right front knee to the right rear hock (the current varied from 0.7mA to 12.5mA rms - root mean square - which corresponded to a voltage between 0.2 to 3.9 V rms, Lefcourt 1982, Lefcourt *et al* 1986), or using a non-piercing ball-end nose clip and a metallic floor to apply a current from the muzzle to the four hooves (the current varied between 2mA to 19mA peak, Reinemann *et al* 1999) behavioural responses such as sudden withdrawal, hoof lifting, vocalizations, kicks or jumps were observed for currents starting at 0.7mA up to 19mA. In other controlled studies, physiological responses to current exposure were investigated. An increase in heart-rate and in plasma cortisol concentration were observed for currents starting at 3.6mA up to 12.5mA rms (from 2.0 to 7.8 V rms) applied with electrodes on the lumbar-sacral region (Gorewit & Scott 1986) or from the udder to the four hooves (use of electrodes and metallic floor, Henke Drenkard *et al* 1985).

In addition, stray voltage threshold has often been studied on a relatively small numbers of animals (< 10 cows) and without allowing the animals to avoid the electric stimulus (review by Hultgren 1990). This is important since it has been shown that when lambs had the opportunity to change from an electrified feeder to a non-electrified feeder, a lower threshold of response was observed compared to the lambs which were not able to change feeder (Duvaux-Ponter *et al* 2006).

The first objective of this work was to determine the threshold at which heifers react to voltage. The voltage was applied to a device similar to that which is found in farms (ie metallic feeder) in a voltage range encountered in field conditions. The animals were able to avoid the voltage if they wanted to. This work was a prerequisite to a field-size experiment which was designed to study the effect of chronic exposure to stray voltage on welfare in dairy cows under farm conditions.

Because stray voltage in a farm occurs mostly in an unpredictable manner (Deschamps 2002), the animals may not be aware of when and where they will come into contact with electricity. If the application of a voltage is foreseeable ie if it is applied every day (which is the case in many experiments), it might be easier for the animal to habituate to the stressor (Gorewit et al 1985; Henke Drenkard et al 1985). If voltage is applied randomly and is therefore unpredictable for the animal, the same stressor could be perceived as more aversive and could delay animal adaptation. This unpredictability can be an important source of stress and could impair animal welfare (Brugère 2002; Sandem et al 2004).

The second objective of this work was to investigate how an animal's past-experience to voltage and its random application could affect the animal's behavioural and physiological responses to subsequent exposure to voltage.

Materials and methods

The scientist in charge of the experiments was licensed to perform experiments on animals and the staff who applied the experimental procedures have attended a special experimentation course approved by the French Ministry of Agriculture.

Animals

Forty Holstein heifers were tested (starting age of 216 ± 59.1 days and 235 ± 54.6 kg of body weight; mean \pm standard deviation). They were housed in four pens, each pen containing 10 heifers of similar weight and age in order to avoid competition at feeding time. The animals were fed once a day at 1600h with a total mixed diet (DM basis: 38% sugar beet pulp, 35% straw, 16% rapeseed meal, 8% pulp-less orange segments, 3% molasses, vitamins and minerals) covering the nutritional requirements for a 200 kg heifer (INRA 1988). Heavier animals received 2.5 kg of the total mixed diet as a supplement per 100 kg above 200 kg body weight. Water, straw and mineral fortified salt licks were available ad libitum. The pens were straw bedded.

Experimental apparatus

The experimental facility was adjacent to the home pens. It consisted of a control room, a test corridor (5.0 m \times 2.5 m), a starting cage (2.0 m \times 0.8 m) with a sliding gate, and two waiting pens (3.0 m \times 4.5 m) at the entrance and exit of the test corridor. The electrical exposure system, at the end of the corridor, consisted of two metallic feeders where voltage was applied and electrical characteristics were recorded by the control-command system installed in the adjacent control room. The metallic feeders were electrically insulated from all the metallic parts of the experimental facility. Each feeder was filled with 700g of a mixture of concentrate (50%) and sugar beet pulp (50%) so that the heifer was able to eat throughout the test in the same feeder or to change feeder. An aluminium plate (2.5 m \times 2.5 m), also

insulated from the other metallic parts, was placed on the floor under the metallic feeders. The walls of the test corridor were covered with plain wood to visually isolate the heifer being tested from the others.

Procedure

During the first experiment, heifers were submitted once a day to a 2min individual test with a progressive increase in the applied voltage. This was done to study the threshold at which a large and durable modification in behaviour was observed. The second experiment was performed to study the effects of the type of electrical stress (daily vs random) and the effect of past-experience to voltage on physiology and behaviour. Each experiment was preceded by a habituation period. Heifers were never in a fasted state during both experiments. The handling order of the heifers from the four pens was alternated each day. The heifers which came spontaneously to the entrance of the starting cage were tested first in order to limit stress due to handling. The tests took place between 0800h and 1300h.

Experiment 1

During a 6wk habituation period (once a day/5d a week), heifers were trained progressively to become accustomed to the test procedure without the application of voltage. In addition, the heifers were habituated to be restrained in a neck-lock in the exit pen at least 60min and for the tail to be handled to facilitate caudal venipuncture blood sampling during the test period.

During the test period which lasted 19 consecutive days, the 40 heifers were divided into two balanced groups according to their weight, age and home pen: 20 heifers were submitted to a daily progressive increase in voltage, in steps of 0.33V, starting at 0V up to 5V (VOLT group, 259 ± 57.5 days old, 270 ± 53.8 kg body weight; mean \pm standard deviation) while the 20 remaining heifers followed the same procedure but without voltage (CONT group, 259 ± 62.1 days old, 273 ± 55.3 kg body weight; mean \pm standard deviation).

In order to standardize the beginning of the test, the heifer was left 15s in the starting cage before the sliding gate was opened to give access to the test corridor. The sliding gate was closed after the passage of the animal. The test started (t_0) once the heifer had eaten for at least 5s in one feeder and lasted 2 minutes. For the VOLT heifers only, the voltage was applied for 2min to the first feeder (called the electrified feeder thereafter) in which the heifer had started to eat for at least 5s. This allowed the heifer to change to the second (non-electrified) feeder if it wanted to. After 2min the feeders were closed with a lid and the heifer was driven to the exit door. Heifers were restrained in the neck-lock in the exit pen until blood collection.

No voltage was applied during the first 4 days of the test period to obtain basal measurements for each animal. The quantity of feed left in each feeder was measured at the end of each 2min test.

Experiment 2

After a break of 2wk without any disturbance, a re-habitation period of 4wk was performed using the same procedure as in the first experiment and without voltage exposure. The forty heifers used previously were allocated to one of 4 groups: previous VOLT heifers with daily voltage exposure (VOLT-DAILY, $n = 10$), previous VOLT heifers with random voltage exposure (VOLT-RAND, $n = 10$), previous CONT heifers with daily voltage exposure (CONT-DAILY, $n = 10$) and previous CONT heifers with random voltage exposure (CONT-RAND, $n = 10$). During the test period, heifers were exposed to a voltage of 3.3V applied during 2min to the feeder in which the heifer had initially started to eat: either, every day over 11 consecutive days (DAILY) or randomly on 4 out of 11 days (on the 1st, 4th, 6th and 10th day, RAND). The four groups were balanced according to weight and age.

Behavioural observations

Four digital cam recorders were placed around the test corridor to continuously record the heifer's behaviour during the test. The video files were saved on a DVD. A Quad 30® allowed the simultaneous visualization of the images recorded by the four cameras. All films were encoded and analysed using The Observer® Software System for Behavioural Research (Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands).

During the first and second test periods, the total feed intake and the electrified feeder intake as a percentage of total feed intake (percentage of feed eaten from the electrified feeder) were calculated for each animal and each day. The time spent eating in the electrified feeder and the latency to change to the non-electrified feeder after the application of the voltage were measured. The number of heifers performing abrupt head movements (ie side-to-side head shaking or an abrupt backward movement of the head) and muzzle-licking were also recorded.

The use of two feeders allowed the heifers to choose which feeder to eat in first. Heifers were characterized according to the strength of their laterality (called side-preference thereafter) by their first preference for one of the feeders. The preference was noted, irrespective of its side, according to three modalities: strong, mild or no first feeder preference. Strong side-preference was defined as the situation when the heifer ate in the same feeder for the first time for more than 90% of the tests, a mild side-preference between 60% and 90%, and no side-preference for less than 60% of the tests.

Cortisol concentration measurements

Blood samples were collected 15min after t_0 . This sampling time allows the measurement of an elevation in cortisol following a mild stressor (routine veterinary procedures) as shown by Alam and Dobson (1986). Moreover, the HPA response to an aversive situation is generally assessed by measuring corticosteroid levels in blood at least 10 min after the animal has been

first exposed to it (for review see Mormède et al 2007). Blood was collected by caudal venipuncture. Moreover, samples were taken within 2min of raising the tail of the heifer by the experimenter. This time interval is likely to be insufficient for plasma cortisol concentrations to have been affected by the handling associated with blood collection (Broom & Johnson 1993).

During the test period of experiment 1, blood samples were taken when voltage application was 1, 3 and 5V. During the test period of experiment 2, blood samples were taken on the 1st and the 10th day of voltage application.

Blood samples were centrifuged at 3000g for 10min at 4°C. Plasma was stored at -20°C until analysis. Plasma cortisol was measured by ELISA using an automated method (Elecsys, Roche Diagnostics, Meylan, France). The sensitivity of the cortisol assay was 0.36 ng.mL⁻¹. The inter-assay coefficient of variation was 4.5% at 124.69 ng.mL⁻¹.

Electrical measurements

EDF R&D (Electricité de France Research & Development) provided the electrical circuit allowing exposure to the chosen alternating (50 Hz) voltage (from 0 to 5 volts \pm 0.01 volt). In order to measure the voltage (rms) applied to the feeder and the current (rms) flowing through the circuit (feeder-heifer-metallic plate), a multichannel transient recorder (Nicolet 2580) associated with an analyzer software was configured to start automatically the recording of the current and voltage. Current measurements (rms) were performed by a current probe with effect Hall Tektronix, placed on the circuit at the exit of the power supply box. This current probe was connected to the Nicolet 2580 through a 50 Ω coaxial link and was calibrated to record current from 0.6 mA (which meant a voltage above 1 V for a resistance of 1700 ohms). For each test, the current (rms) crossing the animal was calculated using the software Team Pro (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, USA). Five measurements of current were averaged per heifer and per day to obtain the mean current. The resistance of the set-up feeder-heifer-metallic plate was calculated by averaging all the data (ie 5 measurements per heifer and per voltage level). The maximal current flowing through the heifer during the test was also recorded (called maximal current thereafter).

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using the Statistical Analysis System software (SAS®, version 9.1.3).

The behavioural observations of experiment 1 were analysed by the MIXED procedure with the model: $Y_{ij} = \mu + U_i + W_j + L_j + r_j + p_j * D + e_{ij}$; where μ represents the overall mean; U_i the fixed effect of Voltage i (from 0 to 5V in steps of 0.33V for the VOLT group and set to 0V for the CONT group); W_j the body weight of the animal j as a co-variable; L_j the fixed effect of the side-preference of the animal j (3 modalities: strong, mild and no-side preference); r_j the random effect of the animal j ; p_j the random regression coefficient of Y on day D for animal j

and e_{ij} the residual error. This model allowed the day effect to be taken into account with the 20 control heifers. Body weight of the animal was used as a co-variable, because it may explain part of the variability observed in the resistance in farm animals.

Behavioural data from experiment 2 were only analysed on the days when voltage was applied to all the heifers, *ie* 1st, 4th, 6th and 10th day. The MIXED procedure was used with the model: $Y_{xyi} = \mu + T1_x + T2_y + C_i + T1_x * T2_y + \text{day} + \text{day}*T1 + \text{day}*T2_y + W_i + r_i + e_{xyi}$; where μ represents the overall mean; $T1_x$ the fixed effect of the past-experience during the experiment 1 (CONT *vs* VOLT: voltage-naïve *vs* voltage-experienced heifers); $T2_y$ the fixed effect for the manner in which voltage was applied (RAND *vs* DAILY: random *vs* every day application of voltage); C_i the maximal current flowing through the heifer as a co-variable; $T1_x * T2_y$ the interaction between the past-experience and the manner in which voltage was applied; day the fixed effect of day (1st, 4th, 6th and 10th day); $\text{day}*T1_x$ the interaction between the day and past-experience; $\text{day}*T2_y$ the interaction between day and the manner in which voltage was applied; W_i the body weight of the animal i as a co-variable; r_i the repeated effect of the animal i and e_{xyi} the residual error.

Cortisol during the experiment 1 (1V, 3V and 5V) and the 1st day of experiment 2 were analysed separately with a MIXED procedure with the treatment (CONT *vs* VOLT) as a fixed effect and body weight as a co-variable. The same model was used to study plasma cortisol on the 10th day of experiment 2, with in addition the manner in which voltage was applied included in the model (RAND *vs* DAILY). Due to technical problems, 10 tests out of 760 could not be recorded during experiment 1 and one test out of 160 could not be recorded during experiment 2.

Finally, qualitative data collected during the two experiments were analysed with a Chi-square test. During experiment 1, due to the low number of animals performing abrupt head movements and muzzle-licking, the data were compiled for 3 periods: from 0.3V to 1.6V, from 2V to 3.3V and from 3.6V to 5V.

All data are presented as least square means (LSMeans) \pm standard errors (SE), except when otherwise stated.

Results

Experiment 1

An effect of day and of the co-variable “body weight” were observed for total feed intake ($P < 0.001$), for electrified feeder intake as a percentage of total feed intake ($P < 0.05$), for time spent eating in electrified feeder ($P < 0.05$) and for latency to change to the non-electrified feeder ($P < 0.01$). Heavier heifers ate more feed, had a smaller electrified feeder intake as a percentage of total feed intake, spent less time eating in the electrified feeder, and had a shorter latency to change to the non-electrified feeder than lighter heifers.

A voltage effect was found for total feed intake ($P < 0.001$), for electrified feeder intake as a percentage of total feed intake ($P < 0.001$), for time spent eating in the electrified feeder ($P < 0.001$) and for latency to change to the non-electrified feeder ($P < 0.001$).

Lower total feed intake was observed at 2V and for voltages from 3 to 4V ($P < 0.05$) compared to feed intake at 0V. Electrified feeder intake as a percentage of total feed intake (Figure 1), time spent eating in the electrified feeder and latency to change to the non-electrified feeder (Figure 2), were lower at $\geq 2.3V$ ($P \leq 0.01$) compared to 0V.

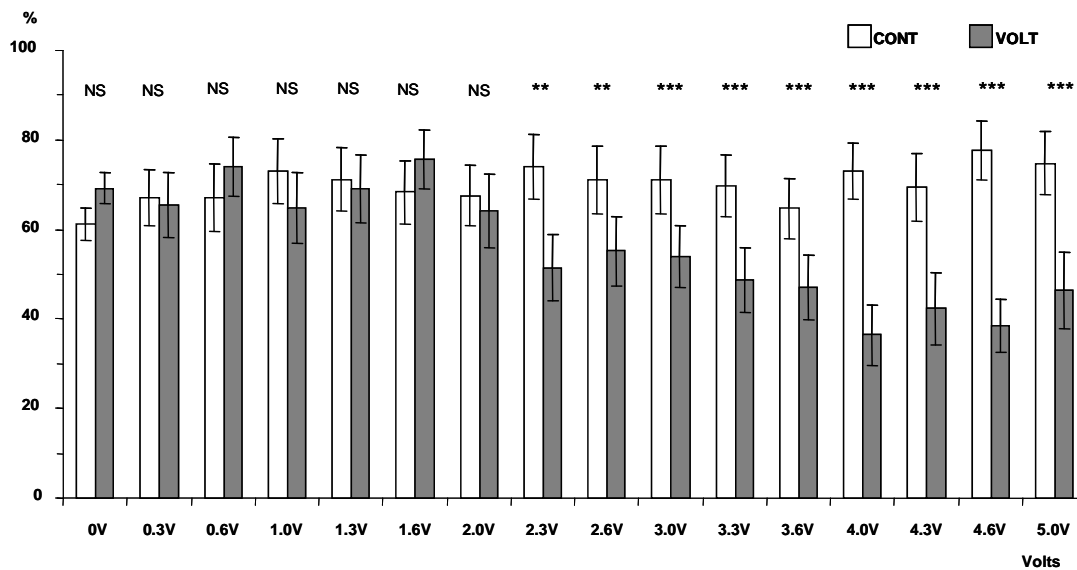


Figure 1. First feeder intake as a percentage of total feed intake (%) in 20 Holstein heifers exposed to stray voltage (VOLT, grey columns) and 20 control heifers with no voltage exposure (CONT, white columns). The voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, between 0 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat. CONT heifers followed the same procedure without voltage exposure.

Means \pm SE. NS non significant; $P > 0.1$; $\dagger 0.05 < P \leq 0.1$; * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$.

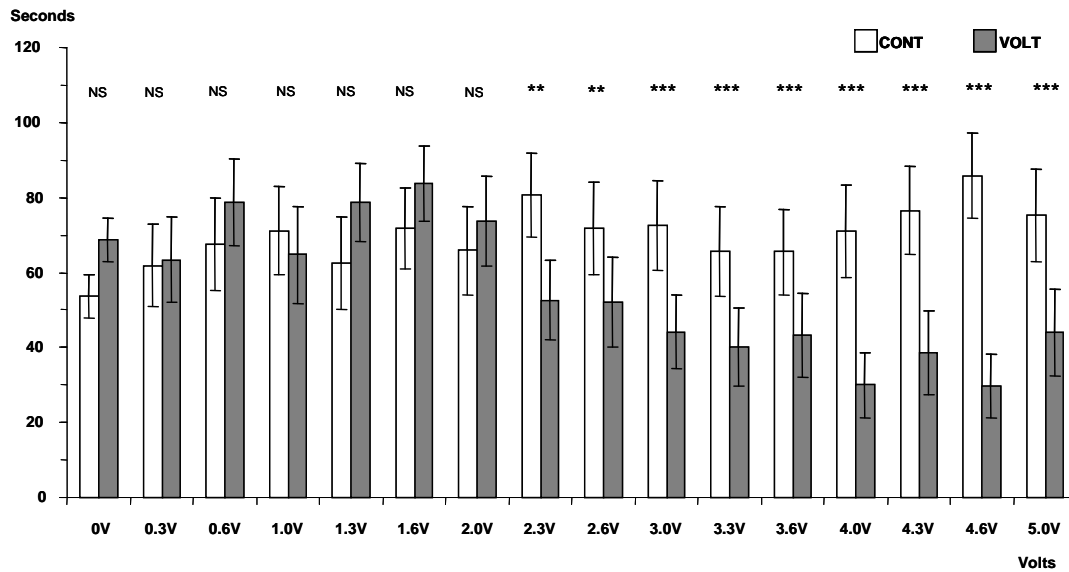


Figure 2. Latency (seconds) to change to the 2nd feeder in 20 Holstein heifers exposed to stray voltage (VOLT, grey columns) and 20 control heifers with no voltage exposure (CONT, white columns). The voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, between 0 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat. CONT heifers followed the same procedure without voltage exposure.

Means \pm SE. NS non significant; $P > 0.1$; $\dagger 0.05 < P \leq 0.1$; * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$.

The number of heifers performing abrupt head movements and muzzle-licking according to the 3 periods of voltage exposure (from 0.3V to 1.6V, from 2V to 3.3V and from 3.6V to 5V) are presented in Table 1. From 0.3V to 1.6V, no differences were observed for the number of heifers performing abrupt head movements and muzzle-licking. From 2V to 3.3V, more VOLT heifers performed abrupt head movements ($P < 0.05$) and muzzle-licking ($P < 0.01$) compared to CONT heifers. The same result was observed for voltages from 3.6V to 5V: more VOLT heifers performed abrupt head movements ($P < 0.05$) and muzzle-licking ($P < 0.01$) compared to CONT heifers (Table 1).

Table 1. Number of Holstein heifers performing abrupt head movements and muzzle-licking. Twenty heifers were exposed to stray voltage (VOLT) and 20 heifers were used as control with no voltage exposure (CONT). The voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, between 0 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat. CONT heifers followed the same procedure without voltage exposure. NS non significant.

	VOLT	CONT	<i>P</i> treatment
Number of heifers performing abrupt head movements			
From 0.3 to 1.6 V	10/97	9/100	<i>NS</i>
From 2.0 to 3.3 V	19/98	8/98	<i>P</i> < 0.05
From 3.6 to 5.0 V	26/98	12/99	<i>P</i> < 0.05
Number of heifers performing muzzle-licking			
From 0.3 to 1.6 V	11/97	12/100	<i>NS</i>
From 2.0 to 3.3 V	27/98	12/98	<i>P</i> < 0.01
From 3.6 to 5.0 V	34/98	17/99	<i>P</i> < 0.01

An effect of the co-variable “body weight” ($P < 0.05$) was observed for plasma cortisol concentrations at 1V, 3V and 5V. At 1V, plasma cortisol concentrations were higher in VOLT heifers than in CONT heifers ($P < 0.05$). No differences were observed at 3V and at 5V (Table 2).

Table 2. Plasma cortisol concentrations (ng.mL⁻¹) in 20 Holstein heifers exposed to stray voltage (VOLT) and 20 heifers used as control with no voltage exposure (CONT). The voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, between 0 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat. CONT heifers followed the same procedure without voltage exposure. Blood samples were collected 15 min after the beginning of the test. Means \pm SE. NS non significant.

Plasma cortisol concentrations (ng.mL ⁻¹)			
	VOLT	CONT	<i>P</i> treatment
1V	5.2 ^a \pm 0.78	2.4 ^b \pm 0.80	<i>P</i> < 0.05
3V	4.8 \pm 1.17	5.2 \pm 1.24	<i>NS</i>
5V	2.6 \pm 0.37	2.4 \pm 0.42	<i>NS</i>

Twenty-two heifers had a strong side-preference, 11 heifers had a mild side-preference and 7 heifers had no first feeder side-preference. An effect of the side-preference was observed on the electrified feeder intake as a percentage of total feed intake ($P < 0.01$): heifers showing a strong side-preference had a greater electrified feeder intake as a percentage of total feed intake than heifers showing a mild or no side-preference. An effect of the side-preference was observed on the time spent eating in the electrified feeder ($P < 0.01$): heifers showing a strong side-preference spent more time eating in the electrified feeder than heifers showing a mild or no side-preference. An effect of the side-preference was observed on the latency to change to the non-electrified feeder ($P < 0.001$): heifers showing a strong side-preference had a greater latency to change to the non-electrified feeder than heifers showing a mild or no side-preference. No effect of the side-preference was observed on total feed intake ($P > 0.10$). Results are given in Table 3.

Table 3. Effect of side-preference on behavioural responses of Holstein heifers. Twenty heifers were exposed to stray voltage (VOLT) and 20 heifers were used as control with no voltage exposure (CONT). The voltage was applied for 2min (every day in steps of 0.33V, between 0 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat. CONT heifers followed the same procedure without voltage exposure. Strong side-preference was defined as the choice of the same feeder as first feeder for more than 90% of the tests, a mild side-preference between 60% and 90%, and a no side-preference for less than 60% of the tests. Means \pm SE. NS non significant.

	Side-preference			<i>P</i>
	No (n = 7)	Mild (n = 11)	Strong (n = 22)	
Total feed intake (g)	481 \pm 23.1	463 \pm 18.3	482 \pm 14.1	NS
Electrified feeder intake as a percentage of total feed intake (%)	41.7 ^a \pm 7.57	42.7 ^a \pm 6.21	62.1 ^b \pm 4.97	$P < 0.01$
Time spent eating in electrified feeder (s)	43.2 ^a \pm 10.32	44.9 ^a \pm 8.44	71.2 ^b \pm 6.80	$P < 0.01$
Latency to change to the non-electrified feeder (s)	21.2 ^a \pm 12.53	29.1 ^a \pm 10.3	66.5 ^b \pm 8.07	$P < 0.001$

The resistance of the feeder-heifer-metallic plate averaged 1704 \pm 103.7 ohms (mean \pm standard error) over the experiment. The maximal current (rms) and mean current (rms) flowing through the set-up feeder-heifer-metallic plate for each day of test are presented in Figure 3. When 2.3V were applied to the feeder, the maximal current through the heifers' bodies was 3.5 \pm 0.24 mA (mean \pm standard error) and the mean current 2.5 \pm 0.13 mA (mean \pm standard error).

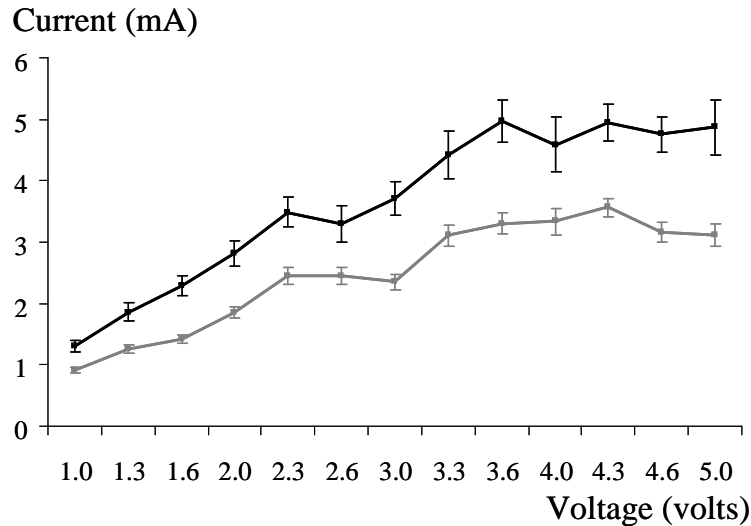


Figure 3. Maximal current (mA, rms, in black) and mean current (mA, rms, average of 5 measurements for each heifer, for each voltage, in grey) flowing through the set-up feeder-heifer-metallic plate in 20 Holstein heifers (VOLT) exposed to voltage applied for 2min (every day in steps of 0.33V, from 1 to 5V) to the first feeder (out of two) in which the heifer initially started to eat.

Experiment 2

An effect of day was found for total feed intake ($P < 0.05$), which was lower on the 1st day in comparison with the other days (4th, 6th and 10th, $P < 0.05$). No effect of day was found for the other variables. An effect of the co-variable “body weight” was found for total feed intake, for electrified feeder intake as a percentage of total feed intake, for time spent eating in the electrified feeder and for latency to change to the non-electrified feeder ($P < 0.05$). Heavier heifers ate more feed, had a smaller electrified feeder intake as a percentage of total feed intake, spent less time eating in the electrified feeder, and had a shorter latency to change to the non-electrified feeder than lighter heifers.

An effect of the co-variable “maximal current flowing through the heifer” was observed on the total feed intake ($P < 0.001$). No effect of the co-variable “maximal current flowing through the heifer” was observed on the other variables.

No effect of past-experience to voltage (VOLT vs CONT) and interaction between past-experience and day were observed for any of the behaviour variables.

An effect of the manner in which voltage was applied (RAND vs DAILY) was observed on electrified feeder intake as a percentage of total feed intake, which was greater for RAND heifers than for DAILY heifers ($45.9 \pm 3.35\%$ vs $36.3 \pm 3.35\%$, respectively, $P = 0.050$). No differences were observed between DAILY and RAND heifers concerning total feed intake, the latency to change to the non-electrified feeder and the time spent eating in the electrified feeder. More RAND heifers tended to perform muzzle-licking than DAILY heifers (28 out of

80 tests vs 18 out of 79 tests, respectively, $P = 0.089$). No interaction between the manner in which voltage was applied and day was observed.

A trend for an interaction between past-experience to voltage (VOLT vs CONT) and the manner in which voltage was applied (RAND vs DAILY) was observed for total feed intake ($P = 0.060$): CONT-DAILY heifers ate more than CONT-RAND heifers while VOLT-DAILY and VOLT-RAND heifers were intermediate (Table 1). A trend was observed for latency to change to the non-electrified feeder ($P = 0.057$): CONT-RAND heifers showed a greater latency to change to the non-electrified feeder than CONT-DAILY heifers; VOLT-RAND and VOLT-DAILY were not different from the other groups (Table 1). In addition, a trend was observed for the number of heifers performing abrupt head movements ($P = 0.061$): more CONT-RAND heifers performed abrupt head movements than CONT-DAILY and VOLT-RAND heifers (Table 4).

Table 4. Behavioural responses of Holstein heifers exposed to stray voltage. Voltage (3.3V) was applied during a 2min test to the feeder in which the heifer initially started to eat, either randomly (4 out of 11d, VOLT-RAND), or daily (on the 11 test days, VOLT-DAILY) using 20 heifers which had previously experienced voltage (VOLT). The same procedure was applied to 20 voltage-naïve heifers (CONT-RAND and CONT-DAILY). LSMeans \pm SE (LSMeans are calculated with the data from 4 days).

	Interaction between past-experience and method used to apply voltage*										Significance		
	VOLT-RAND			VOLT-DAILY			CONT-RAND			CONT-DAILY			
Total feed intake (g)	624 ^{ab}	±	18.1	606 ^{ab}	±	17.7	586 ^b	±	17.9	639 ^a	±	17.7	<i>P</i> = 0.060
Electrified feeder intake as a percentage of total feed intake (%)	43.3	±	4.83	40.6	±	4.73	48.6	±	4.77	32.1	±	4.73	NS
Time spent eating in the electrified feeder (s)	46.2	±	6.72	44.5	±	6.58	51.9	±	6.64	33.01	±	6.67	NS
Latency to change to the non-electrified feeder (s)	30.2 ^{ab}	±	6.92	33.9 ^{ab}	±	6.78	42.6 ^a	±	6.83	19.1 ^b	±	6.87	<i>P</i> = 0.057
Number of heifers performing abrupt head movements/number of tests	13/40 ^a			18/40 ^{ab}			24/40 ^b			14/39 ^a			<i>P</i> = 0.061
Number of heifers performing muzzle-licking/number of tests	11/40			8/40			17/40			10/39			NS

* n = 10 per group. Within a line, means without common superscripts (a, b) differ ($P < 0.05$). NS: non significant.

On the first day when voltage (3.3V) was applied to all heifers, CONT heifers had higher plasma cortisol concentrations than VOLT heifers (5.5 ± 0.73 ng.mL⁻¹ vs 3.2 ± 0.69 ng.mL⁻¹ respectively, $P < 0.05$). On the 10th day, there was no effect of past-experience to voltage (CONT vs VOLT) or the manner in which voltage was applied (RAND vs DAILY) on plasma cortisol concentrations.

Discussion

Voltage threshold

At 2.3V (rms) and above, electrified feeder intake as a percentage of the total feed intake decreased, heifers spent less time eating in this feeder and they changed more quickly to the non-electrified feeder. In addition, more heifers receiving voltage made abrupt head movements and performed muzzle-licking at 2V and above than control heifers. These observations clearly suggest that 2.3V is the voltage threshold at which important and persistent changes in feeding behaviour are observed in heifers under our experimental conditions.

In the present experiment, an alternating (50 Hz) voltage threshold of 2.3 V (rms) corresponded to a maximal current (crossing the circuit feeder-heifer-metallic plate) of 3.5 mA (rms) from which persistent changes in the behaviour of heifers were observed. These results are consistent with the literature. Indeed, in a recently published paper, Erdreich *et al* (2009) have shown using a meta-analysis that cows exhibited their first significant first behavioural responses at 3.0 mA (rms).

In 6 dairy cows, Norell *et al* (1983) observed a specific avoidance response (*ie* mouth opening) to a mouth-all hooves shock during a learned behavioural test (pushing with the muzzle on a metal plate) exhibited 14% of the time at 1.0mA and 92% at 4.0mA. Lefcourt and Akers (1982) reported that only mild behavioural responses (defined as a small sudden movement or vocalisation) occurred in most Holstein cows ($n = 5$) exposed to a voltage of 0.7 V (3mA) between the right front knee and the right rear hock. However, more violent discomfort behaviours were observed after exposure to higher voltages from 1 to 1.5 V (from 3.4 to 5.1 mA). Indeed, Henke Drenkard *et al* (1985) observed that all of the 6 tested cows jumped, kicked, arched their backs and made a backward movement after the application of a 4mA or a 8mA current between the udder and the hooves (which corresponded to a voltage from 2.0 to 7.8 V). In addition, apart from the experiment of Norell *et al* (1983), the current was applied using electrodes and the cows were unable to avoid it which could explain the violent discomfort behaviour. The currents recorded in our experiment were lower than those applied in these experiments which can explain why no violent discomfort behaviours (*ie* arching of the back, jumping, and kicking) were observed. Another explanation is that our

heifers had the choice, after being exposed to voltage, to eat in the non-electrified feeder and so avoid prolonged exposure to voltage.

Discomfort behaviour might be different according to the part of the body where the current is applied. Indeed, Gustafson *et al* (1985) observed that cows performed more hoof lifting than control cows when they were exposed to 3 mA from the front to rear hooves. However, when the cows were exposed to the same current from the mouth (metallic mouth bit) to all hooves the response was an increase in mouth opening. Moreover, Norell *et al* (1983) observed that for current above 2mA (rms) from the mouth to the four hooves, the plate pressing behaviour (to obtain food) was suppressed whereas this behaviour was not suppressed when the cows were exposed up to 6 mA (rms) from the front to the rear hooves. Therefore, the cow's reaction depends on the part of the body to which the current is applied which also means that the consequences for animal welfare will be different. Discomfort related to voltage exposure might be higher when voltage is applied to soft tissue like the mouth or the udder than on other parts of the body, such as the legs, since the electrical properties are different according to the tissue involved (Gabriel *et al* 1996). However, no information was found in the literature to corroborate this hypothesis.

In the present study, the application of voltage between the muzzle and the four hooves induced behavioural changes in the head of the heifers (abrupt backward movement of the head, side-to-side head movement and muzzle-licking). These results are in agreement with the conclusions of Reinemann (2003) who indicated that for studies in which current pulses were applied between the muzzle and the four hooves, facial activity was the most noticeable behavioural response. The abrupt backward movement could be interpreted as an indication of a startle response due to an unexpected event or discomfort and the side-to-side head movement as an indication of discomfort or frustration as proposed by Sandem *et al* (2002) in feed-deprived cows. Muzzle-licking, performed more often for voltages $\geq 2V$, might help heifers to reduce discomfort or pain provoked by the voltage. Indeed, licking, biting or looking at a painful area can be used as an indicator of discomfort or of a painful state (Sawyer 1998). These elements suggest that heifers receiving voltages $\geq 2V$, between the muzzle and the four hooves, exhibited behavioural patterns which could be linked to discomfort on the muzzle. However, it is not known whether this behaviour is due to the nociception induced by the current flowing through the muzzle or to the startle response induced by the occurrence of an unusual event.

The behavioural feeding variables indicated that at 2.3V and above, the situation became uncomfortable enough to reduce eating in the electrified feeder. However, because the heifers were highly motivated to eat concentrate, they modified their feeding behaviour in order to cope with the application of voltage by changing more quickly to the non-electrified feeder but did not stop eating. However, it should be noted that, even if the heifers adapted their behaviour in order to cope with voltage, a general decrease in total feed intake was observed

from 3 up to 4V which could be partly explained by a decrease in feeding time due to an increase in the number of times heifers changed feeder and in the time spent making abrupt head movements or muzzle-licking. These observations suggest that voltages above 2V are distressing. However, further investigation is needed before drawing any firm conclusions regarding nociception.

A few minutes after a stressful event, the level of corticosteroids increases in the blood (review by Mormède *et al* 2007). The increase in cortisol (from 2 to 5 ng.mL⁻¹) observed in VOLT heifers compared to CONT heifers fifteen minutes after the application of 1V to the feeder is similar to the increase observed in cows thirteen minutes after the start of a routine veterinary procedure such as rectal palpation or intramuscular injection (Alam & Dobson 1986). However, no differences were observed between control heifers and heifers exposed to higher voltages (3V and 5V). These findings suggest that voltage produced a stress, or at least an arousal, at a quite low voltage (1V). This voltage corresponds to a maximal current of 1.3mA which is lower than the current of 8mA at which an increase in cortisol concentrations was observed in cows by Henke Drenkard *et al* (1985). For higher voltages (3V and 5V), no further physiological differences were observed, which could be explained by three hypotheses. Firstly, heifers may have quickly habituated to the application of voltage as previously observed in a case of mild stress by Andrade *et al* (2001) after repeated handling and Arnold *et al* (2007) after exposure to noise. Secondly, at 3V and 5V heifers have had much more experience of voltage, and the startling and novel components of the electrical stressor were therefore not present any more. Thirdly, at 2.3V and above, heifers, by spending less time eating in the electrified feeder, reduced their exposure to the stressor.

On the basis of our results, it appears that two different thresholds can be defined. The first, at 1V, corresponds to a transient increase in physiological stress responses. The second, at 2.3V, leads to persistent behavioural reactions suggesting distress. Heifers perceiving an electricity stressor in their environment (as expressed by discomfort/painful state), modified their feeding behaviour in order to reduce the sensation. It is important to note that the detection of the thresholds could be quite different depending on the experimental design. The thresholds might have been higher if the animals did not have the possibility to escape voltage by eating in a non-electrified feeder (Duvaux-Ponter *et al* 2006). Moreover, the threshold would have been lower if it was applied to a water trough because of water's low resistance.

The persistent reaction threshold of 2.3V observed in our experiment corresponds to the mean response of 20 heifers. Large variations were observed between individuals and some heifers changed their feeding behaviour and exhibited a discomfort/painful state before 2.3V while others did not change feeder even at 5V. The animals which did not change feeder could either have a greater resistance or the variability observed in response to voltage could be explained by a strong feeder side-preference. A strong feeder side-preference was observed for 22 heifers out of 40 when they started to eat. According to the task or to the experimental

design, the percentage of animals with a strong side-preference can vary. Indeed, Kilgour *et al* (2006) observed in a specific side-preference test (crossing an obstacle in a corridor to the right or left side) that 80% of the animals (steers and heifers) showed a strong side-preference and crossed the obstacle systematically by the same side. In our experiment, heifers showing a strong feeder side-preference were more reluctant to change to the non-electrified feeder. This kind of response has already been reported in another experiment: Grandin *et al* (1994) observed a trend for heifers to resist modifying a choice once they were accustomed to a reinforcement associated with a specific side. In addition, the resistance to switching is likely to be greater when the choices are only mildly aversive. In our case, the reluctance to switch due to a strong side-preference could explain why some heifers persisted in eating in the electrified feeder at voltages up to 5V. This side-preference perhaps led to an overestimation of the threshold at which heifers reacted to voltage.

The large variation observed between individuals for the threshold can result from a variation in the resistance of contact points. Several authors (Matte *et al* 1992, Reinemann *et al* 1999) have highlighted the fact that the resistance of contact points (entrance and exit) plays an important role in the amount of current flowing through the body. Matte *et al* (1992) exposed 10-week old pigs to 5V from the muzzle to the four hooves on a wet or dry floor and the resistance varied from 2786 ± 320 ohms for a dry floor to 954 ± 35 ohms for a wet floor. According to the Figure 3, it may be possible that from 3.6 V heifers have modified the position of their muzzle to limit the current flowing through their body. Indeed, from 1 to 3.6 V the shape of the curve showed an increase in the current: the maximal current flowing through the body increased proportionally with the increase in voltage. However, from 3.6 to 5 V, the maximal current flowing through the body stopped increasing and reached a plateau of 5mA. It would be interesting to study more precisely the resistance of different contact points (muzzle, tongue or lower jaw) in order to try to explain the variation in the maximal current flowing through the body.

An effect of body weight was observed on feeding behaviour: heavier heifers ate more feed than lighter heifers during the tests, which is in accordance with the literature (Agabriel *et al* 1987, D'Hour *et al* 1991).

Past-experience and unpredictability

During the second experiment, a voltage of 3.3V was chosen, higher than the threshold of 2.3V to make sure that a large number of heifers perceived it.

No effect of previous voltage experience (experienced *vs* naïve) was observed on behaviour. However, higher cortisol concentrations were observed the first day of application of voltage in naïve heifers compared to voltage-experienced heifers.

The difference in cortisol between naïve heifers compared to voltage-experienced heifers was no longer observed at the end of experiment 2. If an increase in cortisol concentrations is interpreted as a stress indicator (Mormède *et al* 2007), these results showed that previous exposure to voltage probably helped the heifers to handle better the first subsequent application of voltage 6wk later. However, similar plasma cortisol concentrations between naïve and voltage-experienced heifers, at the end of the experiment, suggest that naïve heifers habituated to the application of voltage. These results are in accordance with the conclusions of Friend (1991) who put forward the idea that although animals may initially display signs of acute stress in presence of a stressor, they often adapt and learn to cope with it. In calves, repeated exposure to a stressor (30 min transport) increased plasma cortisol concentrations during the first exposure but the increase became less marked in successive trials (Locatelli *et al* 1989). Another explanation for the lack of physiological response at the end of the second experiment could be the fact that the nociceptive threshold was increased following repeated exposures to voltage. Indeed, a change in nociception (hypoalgesia) has been reported in dairy cows exposed to acute stressor (isolation) (Herskin *et al* 2004).

The heifers exposed to voltage in a random manner ate more from the electrified feeder and tended to perform more abrupt head movements than heifers whose feeder was electrified every day. Predictability of a stimulus is an important concept which helps in the understanding of the effect of an electrical stimulus on heifers. In addition, predictability is important in relation to animal welfare (Bassett & Buchanan-Smith 2007). Aneshansley and Gorewit (1991) described the predictability of an electrical exposure as a continuous function with two extremes: an electrical exposure is predictable if it is associated with some easily recognizable event (*e.g.* connection of the udder to the milking machine) whereas the opposite is a totally random exposure, occurring at any time or any place. In our experiment, the random application of voltage was not temporally predictable: no explicit signal associated with the application of voltage warned the heifers that voltage was going to be applied to the feeder. Heifers exposed every day to voltage were able to learn, predict and then adapt their behaviour in order to decrease the negative experience of voltage by changing more quickly to the non-electrified feeder while the lack of predictability did not allow the heifers to learn to adapt their behaviour in order to avoid voltage.

Our findings confirm the interaction between the manner with which voltage was applied (random *vs* daily) and previous voltage experience (experienced *vs* naïve). It seems that naïve heifers receiving a daily application of voltage learned how to cope better with this uncomfortable situation (shortest latency to change feeder and highest total feed intake) compared to naïve heifers exposed to random applications. The latter heifers may have been more disturbed, less efficient and also had less days of exposure to adapt to the situation. The voltage-experienced heifers habituated more to voltage and showed intermediate behaviour

between naïve heifers exposed to random applications of voltage and naïve heifers exposed to a daily application of voltage.

The fact that the co-variable “maximal current flowing through the heifer” had no effect on the behavioural variables (except on total feed intake) indicates that the maximal current flow is not the only factor explaining the response of the animals to low level stray voltage. Indeed, in farm conditions, the unpredictable component of stray voltage exposure could be a more important factor explaining part of the variability of the responses.

Conclusion

A voltage of 2.3V appeared to be the average threshold at which avoidance and behavioural signs of discomfort/nociception started for a large number of heifers under our experimental conditions. Heifers exposed to unpredictable voltage had more difficulty in adapting to this stressor compared to heifers exposed to the same stressor in a predictable manner. Moreover, previous experience with voltage seemed to reduce the effects of subsequent exposures showing the importance of animal habituation to a stressor.

Animal Welfare implications

Stray voltage (less than 10V) can occur in an unpredictable manner in farms and may impair animal welfare. However, the involvement of stray voltage is difficult to diagnose and most studies have been performed under experimental conditions far removed from those encountered in farms and without giving any information on how the animals perceived stray voltage. The first objective of this work was therefore to determine the reaction threshold to stray voltage. Although we applied voltage to a metallic feeder, the animals could avoid the stressor at all times by changing feeder. Moreover, during the experiment, none of the animals exhibited dangerous behaviours (kicking, jumping or agonistic behaviours against the experimenter) that may have affected their health or the security of the experimenters and none of the animals stopped eating during the tests, whatever the voltage used. This work is the first in a series of experiments where, under farm conditions, the medium-term effect of stray voltage will be studied on animal welfare using behavioural, stress physiology and production parameters, based on the threshold defined in this experiment. Moreover, stray voltage occurring in an unpredictable manner may induce more negative effects than when it is experienced on a regular basis and therefore impair animal welfare. Another purpose of this work was to study the influence of unpredictability on heifers' reactions to stray voltage since it is an important factor which needs to be taken into account when studying stray voltage.

Acknowledgments

The authors would like to thank the team of AgroParisTech experimental farm for the care of the animals, F. Fortin and J.P. Gernez (EDF R&D) for the voltage exposure system, M. Carrière for technical assistance, C. Ficheux for the cortisol assays, A.A. Ponter for re-reading the English, RTE for financial support.

References

- Agabriel J, D'Hour P and Petit M 1987 Influence de l'âge et de la race sur la capacité d'ingestion des femelles bovines. *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* 27: 211-212
- Alam MG and Dobson H 1986 Effect of various veterinary procedures on plasma concentrations of cortisol, luteinising hormone and prostaglandin F2 alpha metabolite in the cow. *Veterinary Record* 118: 7-10
- Andrade O, Orihuela A, Solano J and Galina CS 2001 Some effects of repeated handling and the use of a mask on stress responses in zebu cattle during restraint. *Applied Animal Behaviour Science* 71: 175-181
- Aneshansley DJ and Gorewit RC 1991 3 -Physiological and behavioral effects. In: Lefcourt AM (ed.) *Effects of electrical voltage/current on farm animals. How to detect and remedy problems Agriculture handbook*, pp 3-1/3-22
- Arnold NA, Ng KT, Jongman EC and Hemsworth PH 2007 The behavioural and physiological responses of dairy heifers to tape-recorded milking facility noise with and without a pre-treatment adaptation phase. *Applied Animal Behaviour Science* 106: 13-25
- Bassett L and Buchanan-Smith HM 2007 Effects of predictability on the welfare of captive animals. *Applied Animal Behaviour Science* 102: 223-245
- Broom DM and Johnson KG 1993 *Stress and Animal Welfare*. Chapman & Hall, London, UK
- Brugère H 2002 Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage. *Bulletin de la Société Vétérinaire Pratique de France* 86: 182-196
- Deschamps F 2002 L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bulletin de la Société Vétérinaire Pratique de France* 86: 174-181
- D'Hour P, Coulon JB, Garel JP, Mante A and Maronne P 1991 Capacité d'ingestion des génisses : influence de la race, de l'âge et de la qualité du foin. *Annales de Zootechnie* 40: 171-179
- Duvaux-Ponter C, Roussel S, Ennifar M, Fortin F and Louyot T 2006 It is easier to define the aversiveness threshold of stray voltage when animals are allowed to avoid it. In: Mendl M et al (eds.) *Proceedings of the 40th International Congress of the International Society for Applied Ethology*, 8-12 August, Bristol (Royaume-Uni), p 221

- Erdreich LS, Alexander DD, Wagner ME and Reinemann D 2009 Meta-analysis of stray voltage on dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 92: 5951-5963
- Friend TH 1991 Behavioral aspects of stress. *Journal of Dairy Science* 74: 292-303
- Gabriel C, Gabriel S and Corthout E 1996 The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in Medicine and Biology* 41: 2231-2249
- Gorewit RC, Scott NR and Czarniecki CS 1985 Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *Journal of Dairy Science* 68: 718-725
- Gorewit RC and Scott NR 1986 Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *Journal of Dairy Science* 69: 1122-1127
- Grandin T, Odde KG, Schutz DN and Behrns LM 1994 The reluctance of cattle to change a learned choice may confound preference tests. *Applied Animal Behaviour Science* 39: 21-28
- Gustafson RJ, Brennan TM and Appleman RD 1985 Behavioral studies of dairy cows sensitivity to AC and DC electric currents. *Transactions of the ASAE* 28: 1680-1685
- Henke Drenkard DV, Gorewit RC, Scott NR and Sagi R 1985 Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *Journal of Dairy Science* 68: 2694-2702
- Herskin MS, Munksgaard L and Ladewig J 2004 Effects of acute stressors on nociception, adrenocortical responses and behavior of dairy cows. *Physiology & Behavior* 83: 411-420
- Hultgren J 1990 Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Veterinary Research Communications* 14: 287-298
- INRA 1988 Alimentation des Bovins, Ovins, Caprins. INRA, Paris, France
- Kilgour RJ, Melville GJ and Greenwood PL 2006 Individual differences in the reaction of beef cattle to situations involving social isolation, close proximity of humans, restraint and novelty. *Applied Animal Behaviour Science* 99: 21-40
- Lefcourt AM 1982 Behavioral responses of dairy cows subjected to controlled voltages. *Journal of Dairy Science* 65: 672-674
- Lefcourt AM and Akers RM 1982 Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *Journal of Dairy Science* 65: 2125-2130
- Lefcourt AM, Kahl S and Akers RM 1986 Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *Journal of Dairy Science* 69: 833-842
- Locatelli A, Sartorelli P, Agnes F, Bondiolotti GP and Picotti GB 1989 Adrenal response in the calf to repeated simulated transport. *British Veterinary Journal* 145: 517-522

- Mormède P, Andanson S, Auperin B, Beerda B, Guemene D, Malmkvist J, Manteca X, Manteuffel G, Prunet P, Reenen CGv, Richard S and Veissier I 2007 Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiology & Behavior* 92: 317-339
- Matte JJ, Robert S, Godcharles L, Bertin-Mahieux J and Martineau GP 1992 Factors affecting the electrical impedance of growing-finishing pigs. *Canadian Agricultural Engineering* 34: 189-194
- Norell RJ, Gustafson RJ, Appleman RD and Overmier JB 1983 Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Transactions of the ASAE* 26: 1506-1511
- Reinemann DJ, Stetson LE, Reilly JP and Laughlin NK 1999 Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Transactions of the ASAE* 42: 215-222
- Reinemann DJ 2003 Dairy cow response to the electrical environment: a summary of research conducted at the University of Wisconsin-Madison. In: NRAES (ed.) *Stray voltage and dairy farms*, 9-11 April, Camp Hill (Pa), USA, pp 72-83
- Salisbury RM and Williams FM 1967 The effect on herd production of "free" electricity on a milking plant. *New Zealand Veterinary Journal* 15 206-210
- Sandem AI, Braastad BO and Bøe KE 2002 Eye white may indicate emotional state on a frustration-contentedness axis in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science* 79: 1-10
- Sandem AI, Janczak AM and Braastad BO 2004 A short note on effects of exposure to a novel stimulus (umbrella) on behaviour and percentage of eye-white in cows. *Applied Animal Behaviour Science* 89: 309-314
- Sawyer DC 1998 Pain control in small-animal patients. *Applied Animal Behaviour Science* 59: 135-146
- Wilson DJ, Southwick LH and Kaeser DR 1996 Improvement in milk production and udder health following correction of stray voltage on computer feeders. *Agri Practice* 17: 24-29

Chapitre 3 - Effets des courants électriques chez les bovins

Partie 2

2. Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology and, milk production and composition in dairy cows

*Effets à moyen terme de l'exposition répétée à une tension électrique sur l'activité, la physiologie du stress et la production et la composition du lait chez la vache laitière
Journal of Dairy Science (accepté, après modifications mineures)*

Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology and, milk production and composition in dairy cows

Rigalma^{(1)*}, K., Duvaux-Ponter^(1, 2), C., Barrier⁽¹⁾, A., Charles⁽¹⁾, C., Ponter⁽³⁾, A. A., Deschamps⁽⁴⁾, F., Roussel^(1, 2), S.

⁽¹⁾ AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽²⁾ INRA UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽³⁾ UMR INRA-ENVA Biologie du Développement et Reproduction, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 7 avenue du Général-de-Gaulle, 94704 Maisons-Alfort, France

⁽⁴⁾ Réseau de Transport d'Electricité, 34 rue Henri Regnault, 92400 Courbevoie, France

* Corresponding author

Tel.: 33 (0) 1 44 08 18 12; Fax: 33 (0) 1 44 08 17 52; E-mail address: rigalma@agroparistech.fr

INTERPRETIVE SUMMARY

Stray voltage in dairy cows. Rigalma. Stray voltage (<10 V) is an unpredictable electric phenomenon which may impair animal welfare and production. Seventy-four dairy cows were divided into three groups and were exposed to stray voltage (1.8 V) for 8 weeks on their water trough either, permanently (predictable) or randomly (unpredictable, 36 hours per week) or not at all. Permanent exposure may induce a transient acute stress response whereas unpredictable voltage exposure may be considered to be a mild chronic stressor in dairy cows with no impairment in production and only slight modifications in stress physiology.

ABSTRACT

The medium-term effects of permanent or random exposure to stray voltage applied to the water trough on milk production and stress physiology were evaluated in lactating dairy cows. Seventy-four Holstein cows were assigned during two 8-week experimental periods to one of three treatments. The treatments were: permanent exposure to voltage (PERM, 1.8 V, n = 23) applied to the water trough, random exposure to voltage (RAND, 1.8 V, 36 hours per week, n = 25) and no voltage exposure for the control group (CONT, n = 26). On the 1st day of voltage exposure PERM cows had higher activity levels than CONT cows. On the 8th week of exposure, RAND cows had higher activity levels than CONT cows. Stress physiology was modified with higher plasma cortisol concentrations the 2nd week of exposure in RAND cows and with a trend for higher milk cortisol concentrations the 8th week of exposure in RAND cows compared to CONT cows. However, no differences were observed between treatments for cortisol response after an ACTH challenge on the 7th week of exposure. No effects of voltage exposure were observed on production parameters: milk yield, milk composition (fat and protein content, somatic cell counts) and daily water intake. However, a transient decrease in milk yield was observed on the 2nd day of exposure in PERM cows (-1.4 kg) and on the 3rd day of exposure in RAND cows (-3.5 kg) compared to CONT cows.

Permanent exposure to stray voltage (1.8 V, 3.6 mA) could induce a transient acute stress response whereas unpredictable voltage exposure could be considered as a mild chronic stressor in dairy cows with only slight modifications in stress physiology and no impairment in production in the medium-term.

Keywords: stray voltage, dairy cow, unpredictability, chronic stress

INTRODUCTION

Electricity is essential to modern farming techniques and many electrically powered machines are used such as milking machines, automatic feed dispensers, electrically heated water bowls... Leakage of current from these types of equipment, electric and magnetic induction due to high voltage lines or faulty connections between the electrical circuit and the earth can lead to undesirable electrical phenomenon called stray voltage (review by Hultgren, 1990). Stray voltage is defined as a small voltage (less than 10 volts) measured between two points that can be simultaneously contacted by an animal (USDA, 1991). It can produce a low current which can flow through farm animals (Norell et al., 1983).

For the last decades, stray voltage has been considered to be a possible factor impairing production in dairy farms. Although producers and veterinarians have reported reduced production as well as increased health problems and behavioral modifications in cows housed in buildings where stray voltage was detected (review by Hultgren, 1990), the direct implication of stray voltage among other possible factors was not clearly demonstrated. Therefore, experiments have been conducted in dairy cows to evaluate the effects of stray voltage on behavior (Aneshansley et al., 1992, Aneshansley, 2003, Lefcourt, 1982), milk production (Gorewit et al., 1992a, Gorewit and Scott, 1986, Reinemann et al., 2002), health and stress physiology (Aneshansley, 2003, Gorewit et al., 1992b, Southwick et al., 1992). Most of these studies were short-term experiments (except Gorewit et al., 1992a, b) and were performed on a limited number of animals.

Predictability of a stimulus or a stressor is important in relation to animal welfare (Désiré et al., 2002). Indeed, when a stressor occurs in an unpredictable way, it is more stressful for the animal than if the stressor occurs in a predictable fashion (Quirce et al., 1981) which allows the animal to expect its occurrence and eventually to adapt. In most of the experiments on stray voltage, electric stressors were applied in a predictable fashion and cows were able to become habituated to voltage exposure (Gorewit et al., 1985, Henke Drenkard et al., 1985). Indeed, after having observed strong behavioral responses (arching of the back or kicking) at the initial application of 4 mA to the spinal area, Gorewit et al (1985) showed that after 24 hours, dairy cows became habituated to current and by the end of the experimental period (16 days), behavioral responses to the electric stressor were almost non-existent. On farms, stray voltage can occur in a random manner and can be unpredictable for the animals (review by Hultgren, 1990). This may impair animal welfare more than if stray voltage was experienced in a permanent manner. Only a few studies (Gorewit et al., 1985, Aneshansley et al., 1988, Reinemann et al., 2004) have been performed to evaluate the effects of random current or voltage exposure on cow responses (behavior, stress physiology and milk production). Moreover, the conclusions of these studies are conflicting and the effects of random exposure to current need to be clarified.

The aim of this experiment was to investigate with a multi-criteria approach, how random or permanent exposure to a 50 Hz stray voltage applied to the water trough affects behavior, stress physiology and milk production of dairy cows during an 8-week period (medium-term). In order to identify when a possible habituation to voltage occurs, different time scale measurements were used. Thus, in addition to the short term stress responses during the first week of exposure, measurements were performed in the medium-term in order to be able to detect chronic stress effects.

MATERIAL AND METHODS

The scientist in charge of the experiments was licensed to perform experiments on animals and the staff who applied the experimental procedures had attended a special course approved by the French Ministry of Agriculture.

Animals, Feeding and Management, and Housing

Animals. Eighty-six lactating Holstein cows were assigned to one of three treatments before the learning procedure according to their milk yield, parity and stage of lactation (divided into three groups: ≤ 60 days, from 61 to 180 days and ≥ 181 days post-calving). The absence of differences between treatments for somatic cell counts (SCC) was verified after the cows were assigned to their groups. Eleven cows were discarded during the learning procedure because of high stress responses in the stall or difficulties in learning to use the watering device correctly. The final repartition before the beginning of treatment application is described in Table 1. One cow had to be removed due to health problems in week 2 (data from this cow were discarded). One cow was removed in week 6 due to a fall on the slatted floor that led to a severe lameness (data from this cow were used until week 6 included). Therefore, 74 cows were used during the 8-wk experimental period.

Table 1. Basal production characteristics of Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, n = 23), randomly (36h per week, RAND, n = 25) or to no voltage exposure (CONT, n = 26).

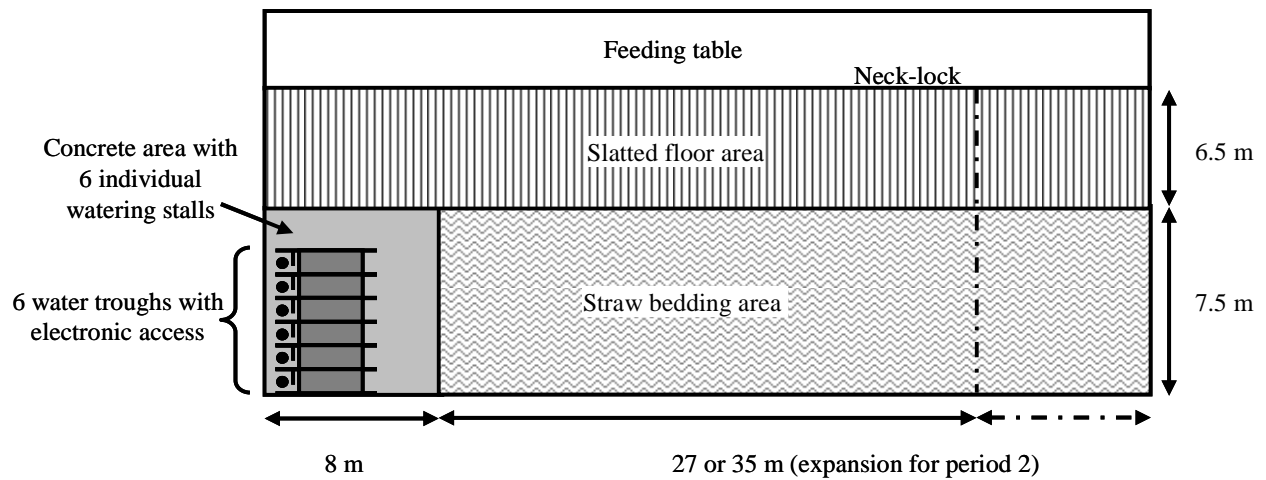
	CONT	PERM	RAND	P treatment
Milk yield (kg/day) ¹	35.4 ± 1.97	33.5 ± 1.53	33.6 ± 1.37	0.665
Parity	2.0 ± 0.17	1.7 ± 0.19	2.0 ± 0.25	0.762
Stage of lactation (days)	154 ± 21.9	160 ± 25.0	165 ± 20.8	0.741

¹ Average of the 2 weeks before the start of exposure to voltage. Means ± standard error.

Feeding and Management. Cows were milked twice-daily at 0700 and 1700 h. A total mixed ration (TMR, dry matter -DM- basis: 43% corn silage, 17% rapeseed meal, 13% sugar beet pulp, 11% brewery byproduct, 11% alfalfa hay, 3% high moisture corn and 2% vitamins and minerals; net energy: 6.76 MJ/kg of DM; true protein digested in the small intestine when fermentable N is limiting: 100g/kg of DM; true protein digested in the small intestine when fermentable energy is limiting: 94g/kg of DM) was given at 0930 h and refusals were pushed towards the cows at 1800 h. Hay, water and salt licks were available ad libitum.

Housing. The animals were housed in the same enclosure (27m × 14m, l × w, for the first period (see below), n = 26; 35m × 14m, l × w, for the second period, n = 48) consisting of a straw bedded area and a slatted floor area which gave access to the feeding table. Six individual watering stalls were placed on a concrete area of approximately 60m², (Figure 1). The watering stalls consisted of a stall (1 × 3 m, w × l) equipped with a gate giving access to a water trough. The electromagnetic opening and closure of the gate was activated by an electronic key located around the neck of each cow and detected by an antenna located in the gate, so that each cow only had access to two watering stalls which were programmed according to its treatment. The stalls were made from plain wood panels, visually and electrically insulated from each other. The water troughs were electrically insulated from all the metallic parts of the pen and were equipped with a water meter. In addition, each trough was equipped with wooden dividers to visually isolate the animals and to prevent access to water by animals located in the neighboring stalls. An aluminium plate (1 × 2.5 m, w × l), insulated from all the other metallic parts and insulated from the ground, was placed on the floor of each stall. For each repetition, water stalls were randomly allocated to each treatment. EDF R&D (Electricité de France Research & Development) provided: the electricity exposure system (alternating 50 Hz voltage), the recording system of current intensity through the body of the cow and the calculation of the resistance of the trough-cow-metallic plate set-up. The trough consisted of a constant level polyethylene bowl with a capacity of 5 liters. A metallic plate was immersed in the water in order to protect the float system (which regulates the level of water in the bowl). It was connected to the exposure system. While drinking, the muzzle of the cow was in contact with the water and with the metallic part of the trough. No pressure on a paddle was needed to obtain water.

Figure 1. Experimental apparatus used to study the effects of an 8-week exposure to voltage on behavior, stress physiology and milk production in Holstein cows.



Treatments

The experiment was conducted over 2 periods with different animals each time: the first period from December to February and the second period from March to May. Each period consisted of three identical phases: i) four weeks of learning and habituation to the watering device and to the experimental procedures such as blood sampling ii) two weeks of recording of the basal level of each animal (called basal period or week 0 thereafter) and iii) eight weeks of exposure to voltage applied to a water trough (weeks 1 to 8). Voltage was applied via the water trough to the aluminum plate placed on the floor of the stall in order to obtain a voltage pathway through the cow from the muzzle to the four hooves. A voltage of 1.8 V was chosen because it was the level of voltage which has been shown to induce a permanent modification in behavior during a short term choice experiment (K. Rigalma, unpublished data). During the 8-week voltage exposure period a voltage of 1.8 V was applied to the two water troughs assigned to each treatment: either permanently (PERM, $n = 23$; $n = 8$ for the first period and $n = 15$ for the second period), or randomly, 36h per week with a duration of exposure varying from 4 hours up to 16 hours (RAND, $n = 25$; $n = 10$ for the first period and $n = 15$ for the second period). Twenty-six cows (CONT; $n = 8$ for the first period and $n = 18$ for the second period) were used as control animals and were never exposed to voltage.

Activity Measurement

Activity levels were recorded using an activity sensor (DeLaval snc, Les Clayes sous Bois, France) connected to ALPRO® (ALPRO, DeLaval snc, Les Clayes sous Bois, France). This activity-sensing transponder, normally used for estrus detection, was securely attached around the neck of the cows with nylon bands. This system is based on detection of physical movement of the cow and records the number of 14-s periods per hour during which the cow

is moving. Activity level (called activity hereafter) of 18 PERM cows, 16 RAND cows and 15 CONT cows was measured during 24 consecutive hours for each day of recording. The measurements were performed on week 0 (2 days), the first (week 1 D1) and the third day (week 1 D3) of week 1, week 2 (2 days) and week 8 (2 days). When two days of measurements were performed per week, the data of the two days were averaged per hour. Differences between the measurement during voltage exposure and week 0 were calculated: $\Delta W1D1$, $\Delta W1D3$, $\Delta W2$, $\Delta W4$ and $\Delta W8$ corresponded respectively to the difference in activity between week 0 and the first day of week 1, the third day of week 1, week 2, week 4, and week 8. Cows in estrus were removed from the analysis.

Physiological Measurements

Plasma Glucose and Cortisol Concentrations. Blood samples were taken once during week 0, week 1, week 2, week 4 and week 8. After restraining the animals with a neck-lock, caudal venipunctures were performed at least one hour after the return from morning milking in order to avoid the peak in plasma cortisol associated with milking, and before the distribution of the TMR. Only blood samples taken in the first two minutes after the start of tail handling of the animal were analyzed to exclude a bias related to an acute stress response during blood collection (only 9 samples of the 369 were discarded). This interval of two minutes is likely to be insufficient for plasma cortisol concentration to have been affected by the handling associated with blood collection. Immediately after collection, samples were placed in iced-cooled water and were centrifuged within an hour at 3 000 g for 10 min at 4°C. Plasma was stored at -20°C until subsequent analysis.

Milk Cortisol Concentration. Milk samples from evening milking were collected during week 0, week 1 D1, week 1 D3, week 2 and week 8. Four milliliters of milk representative of the milk collected from each cow were frozen at -20°C until subsequent analysis.

ACTH Challenge. An adrenocorticotrophic hormone (ACTH) challenge was performed on 42 cows (PERM, n = 14; RAND, n = 14 and CONT, n = 14) at the end of week 7 to assess the activity of the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis. The animals were restrained in a neck-lock and subsequently they were left undisturbed for one hour. Blood samples were then taken for basal cortisol levels and this was followed by a single intravenous injection of ACTH (Synacthene®, Novartis-Pharma, Rueil-Malmaison, France) at a dose of 1.98 IU/kg BW^{0.75} (Munksgaard and Simonsen, 1996) in the tail vein. Blood samples were collected 30, 120 and 180 min after the injection and treated as previously described to measure cortisol responses.

In addition to the maximal plasma cortisol concentration, the integrated response to exogenous ACTH was determined by calculating the area under the curve (C) using the

following formula (Veissier et al., 2001): $C = \Sigma (C_t + C_{t+1})/2 * dt$; where C_t is the concentration at time t and dt is the time in minutes between samples taken at t and $t + 1$.

Cortisol Analysis. Plasma and milk cortisol was measured by ELISA using an automated method (Elecys, Roche Diagnostics, Meylan, France). The sensitivity of the cortisol assay was 0.362 ng.mL⁻¹. The inter-assay coefficient of variation was 4.5% at 124.69 ng.mL⁻¹. Milk samples were prepared as follows: 1 mL of skim milk was mixed with 4 mL ethyl-acetate shaken and centrifuged. Part of the mixture (3.5 mL) was transferred into a tube and dried using an evaporator concentrator. The sample was reconstituted with assay buffer and assayed for cortisol.

Production Measurements

Water Intake. Three digital cameras connected to three time-lapse VCRs were placed above each pair of troughs in order to identify the cows present in the watering stalls at all times. A digital camera, placed above the six water meters and connected to a HDD recorder allowed the recording of the 24-h water consumption in each trough (1 frame per second) during week 0 (2 days), week 1 D1, week 1 D3, week 2 (1 day) and week 8 (1 day). By synchronizing the 3 video-cameras and the water meter measurement, the total amount of water drunk by each cow (called daily water intake hereafter) was measured.

Milk Production and Composition. Each week, the average daily milk yield was calculated using the 7-day milk production (daily milk equaled milk collected in the evening and the milking of the following morning) measured per animal with milk meters (MM15, DeLaval snc, Les Clayes sous Bois, France) connected to ALPRO® (ALPRO, DeLaval snc, Les Clayes sous Bois, France). The difference in milk yield between the second day of voltage exposure and the first day (called $\Delta 2-1$ hereafter) and between the third day of voltage exposure and the second day called $\Delta 3-2$ hereafter) were calculated for each cow. Moreover, the number of cows treated for mastitis was recorded.

Milk samples, collected once weekly (corresponding to a mixture of milk from a successive evening and morning milking), were kept at room temperature with a preservative (Bronopol, Lanxess, Langenfeld, Germany). Samples were sent to the laboratory of the Milk Recording Organisation (Syndicat Interdépartemental de l'Elevage, Le Mée, France) to determine milk fat, protein and lactose concentrations by Infra-Red spectrophotometry (Milkoscan 6000, Fosselectric, Laurel, MD, USA). Somatic cell counts (SCC) were evaluated by flow cytometric measurement (Fossomatic 5000, Fosselectric, Laurel, MD, USA).

Electrical Measurements

A multi-channel transient recorder (Nicolet Data Acquisition System, Nicolet Technologies, Madison, WI, USA) associated with an analyzer software (Nicolet Vision version 3.50, Nicolet Technologies, Madison, WI, USA) was configured to record current and voltage. Current measurements were performed using a current probe (A6302, Tektronix S.A., Les Ulis, France) associated with a current probe amplifier (AM503, Tektronix S.A., Les Ulis, France) placed in the circuit at the exit of the power supply box. This current probe was connected to the Nicolet Data Acquisition System through a 50 Ω coaxial link. The voltage was measured between the electrified trough and the aluminum plate. During the second period, voltage and current measurements (root mean square, rms) were performed on week 3 over 4 days from 0900 h to 1700 h. For each visit to the drinking station by PERM and RAND cows, 10 measurements evenly distributed during the drinking period were collected and aggregated to obtain the average resistance of the experimental set-up; trough-cow-metallic plate and the average current crossing the cow (from muzzle to the four hooves).

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using the MIXED model procedure of SAS® (Statistical Analysis System software, SAS Institute, version 9.1.3) with comparison of the estimates (t-test based). Physiological (plasma and milk cortisol concentration, cortisol response to ACTH challenge) and some production data (daily water intake, $\Delta 2-1$ and $\Delta 3-2$) were analyzed with the following model:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_j + P_k + R_l + T_j * P_k + BW_i + e_{ijkl}$$

where Y_{ijkl} represents the dependent variable; μ the overall mean; T_j the fixed effect of the treatment j with 3 modalities (CONT, PERM and RAND); P_k the fixed effect of the period k with 2 modalities (periods 1 and 2); R_l the fixed effect of the parity with 3 modalities (1, 2 and >2); $T_j * P_k$ the interaction between the treatment j and the period k ; BW_i the average body weight of the animal i during the experiment as a covariate and e_{ijkl} the residual error. For daily water intake, the milk yield of the day was added as an additional covariate. For the activity level, the model was completed with H_z the hour z (1 to 24) as a repeated effect and $T_j * H_z$ the interaction between the treatment j and the hour z .

Concerning milk yield and composition, the model was completed with W_m the week m (1 to 8) as a repeated effect; $T_j * W_m$ the interaction between the treatment j and the week m ; the stage of lactation with 3 modalities (≤ 60 days, from 61 to 180 days and ≥ 181 days after calving) and a pre-experimental covariate (mean value per cow for each variable obtained during the 2-wk of the basal level period).

The selection of the covariance structure was based on minimization of the Akaike criterion value. The unstructured, compound symmetry and first-order autoregressive covariance structures were tested. These covariance structures account for the repeated measurements within cow.

When assumptions of homogeneity of variance and normal distribution of the residuals were not verified, a log or inverse transformation was performed before carrying out the analysis. Qualitative data such as number of cows treated for mastitis were analyzed with a Chi-square test.

Because no meaningful evidence of the effect of parity, stage of lactation or interaction between treatment and period were found, these effects are not presented. LSMeans \pm s.e. are presented except when otherwise stated.

RESULTS

Activity

An effect of treatment ($P = 0.023$) and of hour ($P = 0.026$) were observed on $\Delta W1D1$ (Table 2 and Figure 3): activity of PERM cows was higher than activity of CONT cows ($P = 0.007$). A trend for an effect of treatment ($P = 0.070$) and an effect of hour ($P < 0.0001$) were observed on $\Delta W8$ (Table 2 and Figure 3): activity of RAND cows was higher than activity of CONT cows ($P = 0.022$). No effect of treatment was observed on $\Delta W1D3$, $\Delta W2$ and $\Delta W4$ (Table 2). An effect of period was found for $\Delta W1D3$, $\Delta W2$, $\Delta W4$ and $\Delta W8$ ($P < 0.01$).

Table 2. Activity of Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, $n = 18$), randomly (36h per week, RAND, $n = 16$) or to no voltage exposure (CONT, $n = 15$). Differences in activity (measured in the experimental pen) between week 0 and: the first day of week 1, the third day of week 1, week 2, week 4, and week 8 are presented ($\Delta W1D1$, $\Delta W1D3$, $\Delta W2$, $\Delta W4$, $\Delta W8$, respectively).

	CONT			PERM			RAND			P treatment	P hour of the day
$\Delta W1D1$	-2.3 ^a	\pm	2.74	9.8 ^b	\pm	2.70	2.1 ^a	\pm	2.71	0.023	0.026
$\Delta W1D3$	3.4	\pm	2.40	3.8	\pm	2.54	0.2	\pm	2.585	0.541	0.160
$\Delta W2$	1.4	\pm	2.96	0.1	\pm	3.10	-4.0	\pm	2.98	0.383	0.193
$\Delta W4$	-0.3	\pm	2.79	-0.2	\pm	2.93	0.3	\pm	2.84	0.985	0.086
$\Delta W8$	-7.7 ^a	\pm	3.54	-1.0 ^{ab}	\pm	3.70	4.2 ^b	\pm	3.64	0.069	< 0.0001

^{a, b} Means within a row with different superscripts differ ($P < 0.05$).

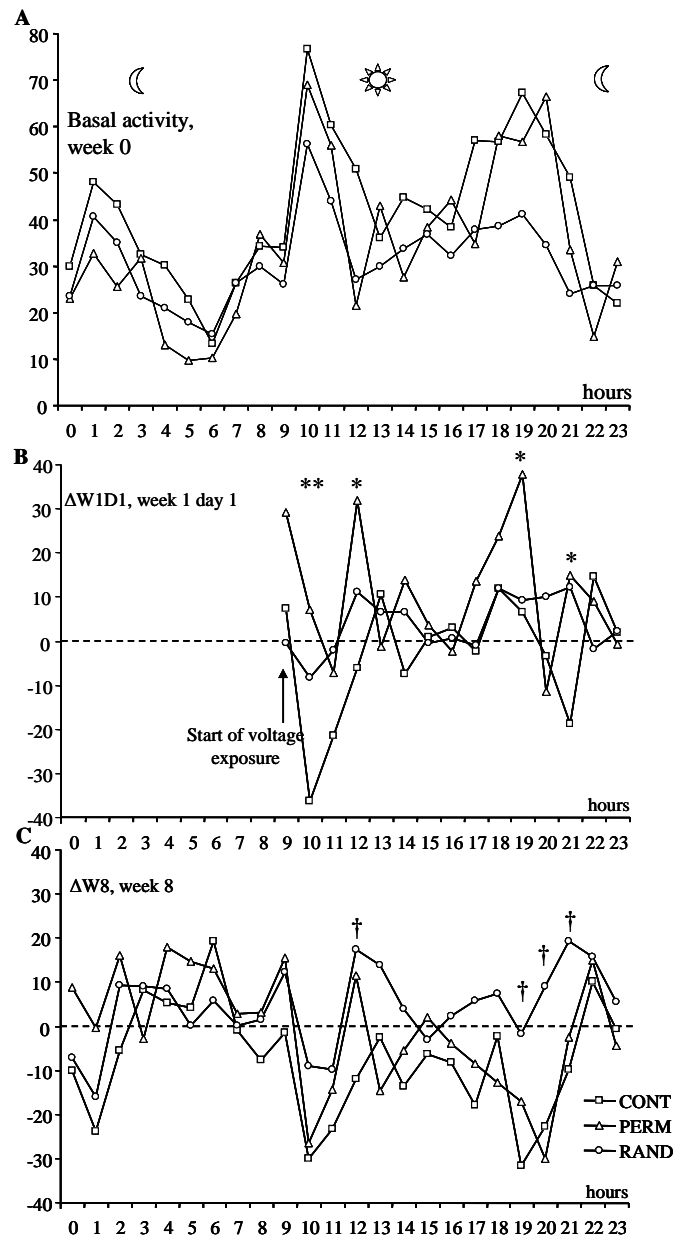


Figure 2. Activity level of Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (Δ PERM, $n = 18$), randomly (\bigcirc 36h per week, RAND, $n = 16$) or to no voltage exposure (\square CONT, $n = 15$). A. Basal activity in week 0 (average of 2 days). B. $\Delta W1D1$: difference in activity between week 1 day 1 and week 0. C. $\Delta W8$: Difference in activity between week 8 (average of 2 days) and week 0. \dagger : $0.05 < P < 0.10$; * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$.

Physiological Measurements

In week 2, a trend for a treatment effect ($P = 0.056$) was found for plasma cortisol concentrations: RAND cows had a higher plasma cortisol than CONT cows ($P = 0.020$) and tended to have higher plasma cortisol than PERM cows ($P = 0.10$) (Table 3). No treatment effects were observed on plasma cortisol concentrations in the other weeks. In week 8, an effect of period was found on plasma cortisol concentrations ($P < 0.001$) (Table 3).

In week 8, an effect of treatment ($P = 0.049$) was found for milk cortisol concentrations: RAND cows tended to have higher milk cortisol concentrations than CONT cows ($P = 0.070$) and had higher milk cortisol concentrations than PERM cows ($P = 0.022$) (Table 3). No differences were observed between treatments for milk cortisol concentrations in the other weeks. In week 1 D1, an effect of period was found for milk cortisol concentrations ($P = 0.002$) (Table 3).

After an ACTH challenge, no treatment effects were observed for the integrated response (area under the curve from 0 to 180 min) ($13\,558 \pm 874.6$ ng.min.mL⁻¹, $13\,206 \pm 794.9$ ng.min.mL⁻¹ and $13\,870 \pm 760.4$ ng.min.mL⁻¹ for CONT, PERM and RAND, respectively, $P = 0.816$) and for the maximal plasma cortisol concentration (Log back transformed data, 95.3 ± 5.61 ng.mL⁻¹, 94.8 ± 5.06 ng.mL⁻¹ and 94.3 ± 4.81 ng.mL⁻¹ for CONT, PERM and RAND, respectively, $P = 0.990$).

Table 3. Plasma and milk cortisol concentrations in Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, n = 23), randomly (36h per week, RAND, n = 25) or to no voltage exposure (CONT, n = 26) during a basal period (week 0, 2 days), day 1 and 3 of week 1 (week 1 D1 and week 1 D3, respectively), week 2 (1 day) and week 8 (1 day) of exposure to voltage.

	CONT	PERM	RAND	<i>P</i> treat. ¹	<i>P</i> period
Plasma cortisol concentration (ng.mL ⁻¹)					
week 0	3.2 ± 0.48	3.0 ± 0.44	3.2 ± 0.47	0.947	0.845
week 1	4.5 ± 0.65	6.0 ± 0.59	4.8 ± 0.59	0.191	0.459
week 2	3.8 ^a ± 0.59	4.4 ^(a) ± 0.59	5.8 ^b ± 0.59	0.056	0.531
week 8	4.8 ± 0.96	5.6 ± 0.90	4.9 ± 0.83	0.757	0.001
Milk cortisol concentration (ng.mL ⁻¹)					
week 0	0.17 ± 0.036	0.20 ± 0.036	0.25 ± 0.056	0.536	0.534
week 1 D1	0.22 ± 0.032	0.24 ± 0.034	0.21 ± 0.030	0.863	0.002
week 1 D3	0.24 ± 0.036	0.18 ± 0.029	0.19 ± 0.028	0.403	0.758
week 2	0.12 ± 0.060	0.16 ± 0.063	0.25 ± 0.056	0.263	0.440
week 8	0.15 ^(a) ± 0.020	0.14 ^a ± 0.020	0.21 ^b ± 0.024	0.049	0.623

^{a, b} Means within a row with different superscripts differ ($P < 0.05$). (a), b Means with superscripts within brackets (a) tend to differ from values with superscript b ($P < 0.05$). 1treat. = treatment.

Production Measurements

No differences were observed between treatments for daily water intake during week 0, week 1 D1, week 1 D3, week 2 and week 8 (Table 4).

Table 4. Daily water intake (L/day) by Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, n = 23), randomly (36h per week, RAND, n = 25) or to no voltage exposure (CONT, n = 26) during a basal period (week 0, 2 days), day 1 and 3 of week 1 (week 1 D1 and week 1 D3, respectively), week 2 (1 day) and week 8 (1 day) of exposure to voltage.

	Daily water intake L/day									
	CONT			PERM			RAND			<i>P</i> treatment
week 0	72.9	±	2.59	76.8	±	2.64	70.8	±	2.36	0.241
week 1 D1	74.3	±	3.37	75.9	±	3.25	74.8	±	3.02	0.933
week 1 D3	71.0	±	4.06	77.1	±	3.58	76.4	±	3.37	0.485
week 2	78.9	±	2.75	79.5	±	2.71	76.6	±	2.54	0.697
week 8	79.5	±	3.95	72.1	±	3.93	77.1	±	3.68	0.382

No differences were observed between treatments for the number of cows treated for mastitis: respectively 4 CONT cows out of 25, 2 PERM cows out of 23 and 5 RAND cows out of 26 during the 8 weeks of exposure ($\chi^2 = 0.427$, $P = 0.808$). No differences between treatments were observed for weekly milk composition (Table 5).

Table 5. Milk production and milk composition of Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, n = 23), randomly (36h per week, RAND, n = 25) or to no voltage exposure (CONT, n = 26).

	CONT			PERM			RAND			<i>P</i> treat. ¹	<i>P</i> week	<i>P</i> treat.*week	<i>P</i> period
Milk yield kg.d ⁻¹	34.7	±	0.59	34.5	±	0.63	33.8	±	0.59	0.550	<0.001	0.643	0.645
Fat g.L ⁻¹	38.0	±	0.60	37.7	±	0.64	38.7	±	0.61	0.400	<0.001	0.448	0.012
Protein g.L ⁻¹	30.9	±	0.50	30.5	±	0.53	31.0	±	0.49	0.773	<0.001	0.283	0.459
Lactose g.L ⁻¹	50.8	±	0.28	50.8	±	0.30	50.5	±	0.28	0.746	<0.001	0.308	0.076
SCC 10 ³ .mL ⁻¹	310	±	58.8	176	±	63.0	271	±	59.9	0.262	0.358	0.428	0.891

¹treat. = treatment. SCC: Somatic Cell Counts.

No treatment differences were observed for average daily milk yield calculated weekly (Figure 2) whereas an effect of week ($P < 0.001$) was observed. However, a treatment effect was observed on $\Delta 2-1$ ($P = 0.026$): a decrease in milk yield was observed in PERM cows compared to RAND cows ($P = 0.119$) (-1.4 ± 0.74 kg, $+1.4 \pm 0.71$ kg and $+0.1 \pm 0.58$ kg, respectively). In addition, a treatment effect was observed for $\Delta 3-2$ ($P = 0.004$): a decrease in milk yield was observed in RAND cows compared to PERM ($P = 0.001$) and CONT cows ($P = 0.011$) (-3.5 ± 1.03 kg, $+1.1 \pm 0.85$ kg and $+0.2 \pm 0.89$ kg, respectively). No differences between treatments were observed the following days.

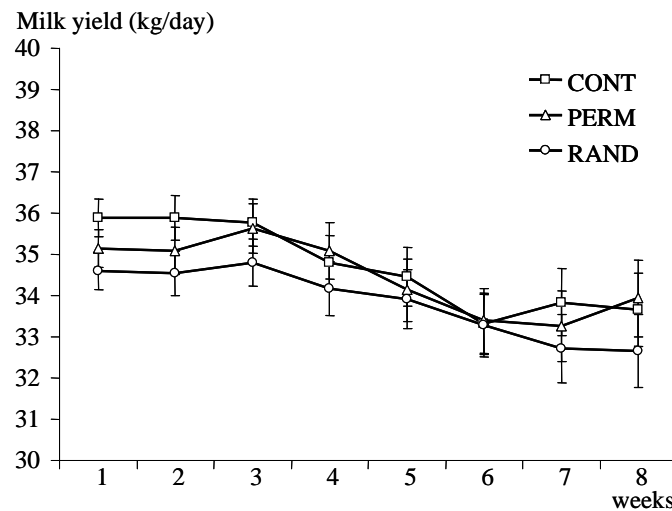


Figure 3. Evolution in milk yield (kg/day) of Holstein cows submitted to an 8-week exposure to voltage (1.8V applied to a water trough) permanently (PERM, $n = 23$), randomly (36h per week, RAND, $n = 25$) or to no voltage exposure (CONT, $n = 26$).

Electrical Measurements

The average resistance of the set-up trough-cow-metallic plate was 516 ± 13.4 ohms (mean \pm s.e.). The resistance varied between 411 and 680 ohms (Figure 4). When a cow was drinking, the average current crossing its body was 3.6 ± 0.08 mA (mean \pm s.e.).

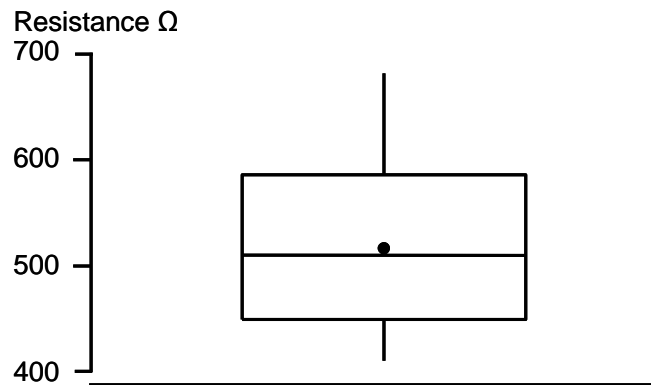


Figure 4. Box-plot of the resistance of the water trough-cow-metallic plate set up. Variation between 411 and 680 Ω . Mean (●) = 516 Ω , Median (—) = 509 Ω . Voltage (1.8V) was applied to the water trough while the cow was standing on a metallic plate, n = 28.

DISCUSSION

The aim of this experiment was to study the medium-term effects of a 50 Hz stray voltage on activity, stress physiology, milk yield and composition. Measurements were performed in order to measure acute as well as chronic stress responses. The voltage was applied to a water trough either permanently or randomly. The reason for applying voltage in an unpredictable way was to mimic farm conditions (Deschamps, 2002). No drastic reductions in water intake or dangerous behavior during voltage exposure were observed in the present experiment.

Activity

An effect of voltage exposure was observed on cow activity. Indeed, on the first day of exposure, cows permanently exposed to voltage exhibited higher activity than control cows and, at the end of the experiment, cows randomly exposed to voltage showed higher activity than control cows. Activity is a criteria used to appreciate comfort and welfare in farm animals. For example, activity of cattle can be influenced by lack of rest (Munksgaard and Simonsen, 1996) or social instability (repeated changes of conspecifics and pens) (Veissier et al., 2001).

In our experiment, during week 0, two diurnal peaks of activity were observed around 1000 h and 1800 h, as previously observed by Linnane et al. (2001). These peaks correspond to feeding (first diurnal peak) and to the return from the afternoon milking accompanied by the push-up of feed refusals (second diurnal peak). In addition, feed intake is usually followed by drinking activity. On the first day of exposure, cows permanently exposed to voltage had higher peaks of activity across the day which could be explained by the fact that the animals were confronted by voltage for the first time. This extra activity could be partly due to the numerous visits to the water trough where the cows were confronted by the novelty and the discomfort of the voltage. This extra activity was more pronounced at the period of the day when drinking activity is usually observed; nearly 66% of the visits to the watering stall are performed between 1000 h and 1900 h. In week 8, cows experiencing random voltage exposure showed higher activity than control cows, especially at the end of the day. This increase in activity at the end of the day was also reported in calves submitted to repeated regrouping and relocation which were feeding and stepping (taking at least one step) more from 1800 to 2000 h compared to control calves (Veissier et al, 2001).

These results could indicate that acute and chronic exposure to stray voltage may induce medium-term changes in the circadian rhythm of activity in dairy cows. Permanent exposure to stray voltage may transiently increase animal activity because on the first day the animals were agitated whereas after the third day no agitation was observed. The fact that the increase in activity was still present after 8 weeks in the cows randomly exposed to electricity may indicate a lack of habituation of the animals. Nevertheless, because of the variability in activity between individuals, further investigations are needed before drawing any firm conclusions and more behavioral variables, such as drinking behavior should be studied in order to confirm these effects.

Stress Physiology

During the first week of exposure to voltage, no differences between treatments were observed for basal plasma cortisol concentrations. In the second week of voltage exposure, cows exposed to random voltage had greater basal plasma cortisol concentrations than control cows. Thereafter, this difference disappeared. In addition, higher milk cortisol concentrations were recorded during week 8 in cows randomly exposed to voltage compared to control cows.

In our experiment, the choice was made not to measure plasma cortisol concentrations immediately after exposure to the electrified trough (i.e. acute response to the stressor). This was in order not to disturb the activity of the animals by restraining them to obtain blood samples. It has already been observed in other experiments that exposing cows to a similar electric stressor (4 mA during milking) induced an acute stress response with an increase in plasma cortisol (Henke Drenkard et al., 1985) 10 min after exposure to the stressor. However,

in other experiments (Lefcourt et al., 1986, Reinemann et al., 2003), no effects of electric current (from 2.5 to 12.5 mA) were reported on plasma cortisol concentrations 15 min after exposure to the stressor.

In the literature, it has been reported that chronic stress could induce either a decrease or an increase in basal cortisol concentrations. Indeed, van Reenen et al. (2000) observed a slight decrease in basal cortisol concentrations in calves chronically stressed by isolation whereas Barnett et al. (1988) observed an increase in basal cortisol concentrations in pigs chronically stressed by housing conditions (tether stalls). However, Jensen et al. (1996) observed no differences in basal cortisol concentrations in pigs receiving unpredictable and inescapable electric shocks (2700 V, 0,25 mA, 60 to 65 pulses per second) applied to the neck region during a month compared to control pigs. Nevertheless, it is difficult to demonstrate the presence of a chronic stress without vascular catheterisation and frequent blood sampling. Indeed, in cattle, basal plasma cortisol concentrations are only slightly elevated in chronic stress and vary greatly due to ultradian and diurnal rhythms (Mormède et al., 2007). Thus, additional cortisol measurements could be useful to evaluate chronic stress.

Cortisol in the milk can be used as a non invasive way of measuring cortisol. It has been shown that measurements of cortisol concentrations in milk and blood were closely correlated (Verkerk et al., 1998). If the interval between two milkings is short, milk cortisol instantaneously reflects changes in blood cortisol (Termeulen et al., 1981). It is usually accepted that milk cortisol concentrations are a good indicator of the response to an acute stressor in lactating cows when it occurs within a period up to two hours before milk sampling (Verkerk et al., 1998). Thus, the higher milk cortisol recorded in cows randomly exposed to voltage could indicate that, even after 8 weeks, the cows were not completely habituated to voltage. Indeed, in the 8th week, on the day of milk sampling, the random voltage exposure was between 1300 to 1500 h, thus from 4 up to 2 hours before the milk sample was taken (cows were milked each day at 1700 h). Therefore, after 8 weeks, cows exposed to unpredictable voltage still responded to voltage and did not habituate to it. The opposite was observed in cows exposed permanently to stray voltage. This result could indicate that the cows exposed to unpredictable voltage experienced a mild chronic stress.

Chronic stress can also be studied by assessing the reactivity of the HPA axis. The stimulation of the HPA axis is usually performed by injecting intravenous synthetic ACTH and by measuring the area under the cortisol response curve (Veissier et al., 2001). During our experiment, after 7 weeks of exposure to electricity, no modifications in the area under the cortisol response curve or the maximal cortisol response after ACTH injection were observed. However, induction of chronic stress in dairy cows does not automatically result in a change in the reactivity of the adrenal gland (Munksgaard and Simonsen, 1996).

Permanent exposure to stray voltage did not modify any of the stress cortisol indicators probably indicating a habituation of the animals to the stressor when it was experienced in a

permanent and predictable way whereas random voltage exposure seemed to have at least some effects on the stress physiology of the cows, even if only transient modifications could be detected. In cows, habituation to an electric stressor has already been observed by Gorewit et al. (1985) and Henke Drenkard et al. (1985). However, in the present experiment, additional criteria of chronic stress such as an ACTH challenge did not confirm modifications in stress physiology in cows exposed to electricity. More research is needed to fully understand the stress physiology of cows in the presence of a long lasting stressor.

Water Intake, Milk Production and Composition

No modifications in daily water intake were observed after treatment application which is in agreement with the results of several experiments (Aneshansley et al., 1988, Gorewit et al., 1992a, Reinemann et al., 2005). In addition, daily water intake recorded during this experiment was similar to daily water intake of other studies (review by Cardot et al., 2008).

An effect of week was observed on milk yield and reflected the physiological decline in milk yield with increasing stage of lactation after peak production. No differences were observed between treatments for milk production and milk composition. The lack of effect of voltage exposure on milk yield and milk composition is in agreement with results obtained when voltage was applied to a water trough over the whole lactation period (Gorewit et al., 1992a) or when it was applied during milking (Henke Drenkard et al., 1985, Reinemann et al., 2002). However, between the first and the second day of voltage exposure, milk yield decreased in cows permanently exposed to voltage. In addition, a decrease in milk yield between the second and the third day was observed in cows randomly exposed to voltage compared to control cows. No other differences were observed the following days. Our results are in agreement with those of Reinemann et al. (2005) who observed in cows a decrease in milk yield in the first two days of current exposure (with a peak current from 8.5 to 20 mA). This result indicates that cows were transiently disturbed by exposure to stray voltage during the first two days when it was applied in a permanent manner. This disturbance occurred with a longer delay when voltage exposure was unpredictable.

Field observations indicate that stray voltage impairs production in dairy cows (a decrease in milk yield and an increase in somatic cell counts) (Wilson et al., 1996). However, no studies in controlled environments have been able to confirm these results (Gorewit et al., 1992b, Lefcourt et al., 1985, Southwick et al., 1992). In dairy cows, the application of a voltage (1, 2 or 4 V) to a trough over the whole lactation period had no impact on milk yield (Gorewit et al., 1992a) and on the incidence of mastitis (Gorewit et al., 1992b). It is possible that stray voltage only has a negative effect on milk yield or composition in the presence of multiple stressors. Indeed, the effects of voltage were more pronounced on the behavior of pigs already

facing a stressful situation such as feed rationing compared to when voltage was applied alone: modified feeding and drinking behaviors, an increase in agonistic interactions and a decrease in rest time (Robert et al., 1991, 1992). During our experiment, cows were maintained in good housing conditions: adequate space, no competition for feed and no mixing with foreign animals. These conditions allowed the animals to express their full production potential. These “comfortable” rearing conditions may in part explain the lack of effects of stray voltage on the production parameters.

Electrical Measurement and individual variability

In the present experiment, the alternating (50 Hz) voltage of 1.8 V corresponded to an average current (crossing the circuit trough-cow-metallic plate) of 3.6 mA. The calculated resistance of the set-up, trough-cow-metallic floor, was 516 ± 13.4 ohms, slightly higher than the average value cited in the literature for the mouth-all hooves pathway of 359 ohms (from 244 to 525 ohms, Norell et al., 1983). This difference could be explained by the fact that in Norell et al. (1983) experiments a specific piece of equipment (e.g. a metallic grid in the mouth of the cows) was used to reduce the contact resistance. The variability of the resistance of the set-up trough-cow-metallic plate (from 411 to 680 ohms) could be partly explained by the resistance of the set-up muzzle-trough. Indeed, cows positioned their muzzle differently in the water trough and this could have led to a variation in the resistance of the set-up muzzle-trough: some cows put their muzzle deep in the bowl, others maintained their muzzle on the surface of the water and some drank while leaning the head on the side of the trough. Drinking behavior has already been reported to be a possible factor of variation in the electrical resistance of cows. Indeed, Reinemann et al. (2005) observed a change in drinking behavior after voltage exposure: some cows exerted a pressure on the trough and therefore increased the contact surface muzzle-trough and reduced the current density at the level of their muzzle. Further investigation is necessary to relate the position of the muzzle in the bowl to the resistance of the contact point. In addition, other factors such as past experience can induce variations in animal responses (K. Rigalma, unpublished results). The variability of behavioral or physiological responses or current sensitivity among dairy cows has already been observed in controlled studies (Gorewit et al., 1989, Reinemann et al., 1999).

Unpredictability

On the farm, stray voltage is an intermittent or random phenomenon, which makes it unpredictable for animals (Deschamps, 2002). In our experiment, random exposure to voltage consisted of several periods of different durations from 4 hours up to 16 hours. Permanent exposure to stray voltage is classically used in the literature: animals are routinely subjected to the electric stressor. However, unpredictability of electricity can be more disruptive to the

animal. Indeed, studies on stress in livestock indicate that the response of an animal to its environment does not depend on the situation itself but rather on the interpretation that the animal makes of this situation (Boissy et al., 2007). Predictability is one of the criteria which would allow the animal to assess a situation (Désiré et al., 2002) and may modify its behavior: sheep subjected to a predictable startling event were less stressed than sheep for which the event was unpredictable (Greiveldinger et al., 2007). In our experiment, unpredictable stray voltage seemed to generate a higher and more persistent response than permanent (predictable) stray voltage. Moreover, physiological measurements seemed to indicate that the unpredictable stressor induced a chronic stress response.

Stray Voltage, a Mild Stressor

Under intensive or extensive farming conditions, cattle may be exposed to various social or environmental stressors. In dairy cows, some stressors are responsible for lasting behavioral and physiological changes, and for reduced productivity. Indeed, heat stress induced an increase in rectal temperature and respiration rate, and a decrease in dry matter intake and milk yield (West, 2003). Moreover, reproductive efficiency declined in dairy cattle subjected to heat stress (Jordan, 2003). Repeated regrouping of unfamiliar animals induced an increase in agonistic behaviors, changes in feeding behavior, and a decrease in milk production (Bøe et Færevik, 2003).

The fact that the exposure of the cows to 1.8 V (3.6 mA) applied to a water trough did not impair production may indicate that such a low stray voltage is a mild stressor, inducing only behavioral and physiological changes, unlike heat stress or repeated regrouping which could be considered as severe stressors.

CONCLUSIONS

Repeated exposure to stray voltage induced a response of acute stress at the beginning of the experiment with a transient decrease in milk production and an increase in activity in cows permanently exposed to voltage. These effects were short-lived. However, unpredictable exposure to stray voltage may generate a chronic stress, with a slight increase in basal plasma cortisol and milk cortisol and an increase in activity. The response to an ACTH challenge, used to test the reactivity of the adrenal gland, was not modified at the end of the experiment by stray voltage. As opposed to field observations, our experiment, using 1.8 V applied to a water trough, did not affect milk yield and composition and, somatic cell counts. In the context of this experiment, stray voltage could be considered to be a mild chronic stressor in dairy cows, especially when it is unpredictable, with only slight modifications in stress physiology accompanied by changes in activity. Moreover, no impairment of milk production was observed in the medium-term.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank D. Tristant and the staff of the Experimental Farm of AgroParisTech for the care of the animals, F. Fortin and J.P. Gernez (EDF R&D) for the electricity exposure system, M. Carrière for technical assistance, C. Ficheux for her help in cortisol analysis and RTE for financial support.

REFERENCES

- Aneshansley, D. J., R. C. Gorewit, and L. R. Price. 1992. Cow sensitivity to electricity during milking. *J. Dairy Sci.* 75:2733–2741.
- Aneshansley, D. J., R. C. Gorewit, L. R. Price, and C. S. Czarniecki. 1988. Effects of discontinuous voltages applied to waterers. American Society of Agricultural Engineers Annual International Meeting. Technical Paper No. 88-3523:15. ASAE St Joseph, MI.
- Aneshansley, D. J. 2003. Stray Voltage Research at Cornell University. in Proceedings of “Stray Voltage and Dairy Farms” A Conference for Farm Advisors, Educators, Utilities, and Public Policy Advisors. Pages 63–71. NRAES ed, Camp Hill, Pennsylvania, USA.
- Barnett, J. L., P. H. Hemsworth, G. M. Cronin, C. G. Winfield, T. H. McCallum, and E. A. Newman. 1988. The effects of genotype on physiological and behavioural responses related to the welfare of pregnant pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 20:287–296.
- Bøe, K. E., and G. Færevik. 2003. Grouping and social preferences in calves, heifers and cows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 80:175–190.
- Boissy, A., C. Arnould, E. Chaillou, V. Colson, L. Désiré, C. Duvaux-Ponter, L. Greiveldinger, C. Leterrier, S. Richard, S. Roussel, H. Saint-Dizier, M. C. Meunier-Salaün, and D. Valance. 2007. Emotion and cognition: a new strategy to achieve animal welfare. *INRA Prod. Anim.* 20:17–21.
- Cardot, V., Y. Le Roux, and S. Jurjanz. 2008. Drinking behavior of lactating dairy cows and prediction of their water intake. *J. Dairy Sci.* 91:2257–2264.
- Deschamps, F. 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bull. Soc. Vet. Prat. France* 86:174–181.
- Désiré, L., A. Boissy, and I. Veissier. 2002. Emotions in farm animals: a new approach to animal welfare in applied ethology. *Behav. Proc.* 60:165–180.
- Gorewit, R. C., D. J. Aneshansley, D. C. Ludington, R. A. Pellerin, and X. Zhao. 1989. AC voltages on water bowls: effects on lactating Holsteins. *J. Dairy Sci.* 72:2184–2192.

- Gorewit, R. C., D. J. Aneshansley, and L. R. Price. 1992a. Effects of voltages on cows over a complete lactation .1. Milk-yield and composition. *J. Dairy Sci.* 75:2719–2725.
- Gorewit, R. C., D. J. Aneshansley, and L. R. Price. 1992b. Effects of voltages on cows over a complete lactation .2. Health and reproduction. *J. Dairy Sci.* 75:2726–2732.
- Gorewit, R. C., and N. R. Scott. 1986. Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* 69:1122–1127.
- Gorewit, R. C., N. R. Scott, and C. S. Czarniecki. 1985. Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *J. Dairy Sci.* 68:718–725.
- Greiveldinger, L., I. Veissier, and A. Boissy. 2007. Emotional experience in sheep: Predictability of a sudden event lowers subsequent emotional responses. *Physiol. Behav.* 92:675–683.
- Henke Drenkard, D. V., R. C. Gorewit, N. R. Scott, and R. Sagi. 1985. Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* 68:2694–2702.
- Hultgren, J. 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet. Res. Commun.* 14:287–298.
- Jensen, K. H., L. J. Pedersen, E. K. Nielsen, K. E. Heller, J. Ladewig, and E. Jørgensen. 1996. Intermittent stress in pigs: Effects on behavior, pituitary - Adrenocortical axis, growth, and gastric ulceration. *Physiol. Behav.* 59:741–748.
- Jordan, E. R. 2003. Effects of heat stress on reproduction. *J. Dairy Sci.* 86:104–114.
- Lefcourt, A. M. 1982. Behavioral responses of dairy cows subjected to controlled voltages. *J. Dairy Sci.* 65:672–674.
- Lefcourt, A. M., R. M. Akers, R. H. Miller, and B. Weinland. 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *J. Dairy Sci.* 68:391–401.
- Lefcourt, A. M., S. Kahl, and R. M. Akers. 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *J. Dairy Sci.* 69:833–842.
- Linnane, M. I., A. J. Brereton, and P. S. Giller. 2001. Seasonal changes in circadian grazing patterns of Kerry cows (*Bos taurus*) in semi-feral conditions in Killarney National Park, Co. Kerry, Ireland. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 71:277–292.
- Mormède, P., S. Andanson, B. Auperin, B. Beerda, D. Guemene, J. Malmkvist, X. Manteca, G. Manteuffel, P. Prunet, C. G. van Reenen, S. Richard, and I. Veissier. 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol. Behav.* 92:317–339.

- Munksgaard, L., and H. B. Simonsen. 1996. Behavioral and pituitary adrenal-axis responses of dairy cows to social isolation and deprivation of lying down. *J. Anim. Sci.* 74:769–778.
- Norell, R. J., R. J. Gustafson, R. D. Appleman, and J. B. Overmier. 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. ASAE* 26:1506–1511.
- Quirce, C. M., M. Odio, and J. M. Solano. 1981. The effects of predictable and unpredictable schedules of physical restraint upon rats. *Life Sci.* 28:1897–1902.
- Reinemann, D. J., L. E. Stetson, J. P. Reilly, and N. K. Laughlin. 1999. Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Trans. ASAE* 42:215–222.
- Reinemann, D. J., M. D. Rasmussen, and S. D. LeMire. 2002. Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Trans. ASAE* 45:833–838.
- Reinemann, D. J., L. E. Stetson, N. E. Laughlin, and S. D. LeMire. 2005. Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Trans. ASAE* 48:385–392.
- Reinemann, D. J., L. E. Stetson, and S. D. LeMire. 2004. Comparison of dairy cow aversion to continuous and intermittent current. *Trans. ASAE* 47:1257-1260.
- Reinemann, D. J., M. C. Wiltbank, M. D. Rasmussen, L. G. Sheffield, and S. D. LeMire. 2003. Comparison of behavioral to physiological response of cows exposed to electric shock. *Trans. ASAE* 46:507–512.
- Robert, S., J. J. Matte, J. Bertin-Mahieux, and G. P. Martineau. 1991. Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Can. J. Vet. Res.* 55:371–376.
- Robert, S., J. J. Matte, J. Bertin-Mahieux, and G. P. Martineau. 1992. Stray voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Can. J. Anim. Sci.* 72:467–475.
- Southwick, L. H., D. J. Wilson, and P. M. Sears. 1992. Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one or two volts of alternating current. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 201:441–444.
- Termeulen, S. B., W. R. Butler, and R. P. Natzke. 1981. Rapidity of cortisol transfer between blood and milk following adrenocorticotropin injection. *J. Dairy Sci.* 64:2197–2200.
- USDA. 1991. Effects of electrical voltage / current on farm animals: How to detect and remedy problems. A. M. Lefcourt, ed. *Agriculture Handbook No. 696*. USDA, Washington, DC. 142 pp.
- van Reenen, C. G., M. H. Mars, I. E. Leushuis, F. A. M. Rijsewijk, J. T. van Oirschot, and H. J. Blokhuis. 2000. Social isolation may influence responsiveness to infection with bovine herpesvirus 1 in veal calves. *Vet. Microbiol.* 75:135–143.

- Veissier, I., A. Boissy, A. M. de Passille, J. Rushen, C. G. van Reenen, S. Roussel, S. Andanson, and P. Pradel. 2001. Calves' responses to repeated social regrouping and relocation. *J. Anim. Sci.* 79:2580–2593.
- Verkerk, G. A., A. M. Phipps, J. F. Carragher, L. R. Matthews, and K. Stelwagen. 1998. Characterization of milk cortisol concentrations as a measure of short-term stress responses in lactating dairy cows. *Anim. Welf.* 7:77–86.
- West, J. W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131–2144.
- Wilson, D. J., L. H. Southwick, and D. R. Kaeser. 1996. Improvement in milk production and udder health following correction of stray voltage on computer feeders. *Agri Practice* 17:24–29.

Chapitre 3 - Effets des courants électriques chez les bovins

Partie 3

3. Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on behavioral and physiological responses in dairy cows

*Effets à moyen terme de l'exposition répétée à une tension électrique sur les réponses comportementales et physiologiques chez la vache laitière
(en préparation)*

Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on behavioral and physiological responses in dairy cows.

Rigalma^{(1)*}, K., Duvaux-Ponter^(1, 2), C., Carrière⁽¹⁾, M., Charles⁽¹⁾, C., Barrier⁽¹⁾, A., Deveau⁽³⁾, L., Roussel^(1,2), S.

⁽¹⁾ AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽²⁾ INRA UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

⁽³⁾ Réseau de Transport d'Electricité, 34 rue Henri Regnault, 92400 Courbevoie, France

* Corresponding author

Tel.: 33 (0) 1 44 08 18 12; Fax: 33 (0) 1 44 08 17 52; E-mail address: rigalma@agroparistech.fr

ABSTRACT

The medium-term effects of permanent or random exposure to stray voltage applied to the water trough on behavior and stress physiology were evaluated in lactating dairy cows. Seventy-four Holstein cows were assigned during two 8-week experimental periods to one of three treatments. The treatments were: permanent exposure to voltage (PERM, 1.8V, n=23) applied to the water trough, random exposure to voltage (RAND, 1.8 V, 36 hours/week, n=25) and no voltage exposure for the control group (CONT, n=26). On the 1st day of voltage exposure PERM and RAND cows visited more the water trough, drunk less per visit and had a higher mean heart rate than CONT cows. From the 1st day to the 2nd week of exposure, PERM and RAND cows made more visits with at least one sniffing of the trough and less visits with at least one lapping than CONT cows. The 8th week PERM and RAND cows had a smaller latency to drink after entering the watering stall and were still doing less visits with at least one lapping than CONT cows. In addition the 8th week, RAND cows drunk less per visit, made more visits with at least one sniffing of the trough and had a higher heart rate during drinking than CONT cows. The emotional reactivity was evaluated in a motivational test and in a novel object test at the entrance of the watering stall on the 6th week of exposure. PERM and RAND cows showed the same motivation to drink than CONT cows. In the presence of the novel object, PERM and RAND cows were faster to drink than CONT cows. PERM cows were faster to interact with the object, while RAND cows interacted less with it than CONT cows.

Exposure to stray voltage (1.8 V) induced a transient acute stress response. On a medium-term, while no signs of stress were found in cows exposed permanently to stray voltage, unpredictable voltage exposure might have induced a mild chronic stress in dairy cows. The emotional reactivity seemed to be modified by the exposure to the stressor: a permanent exposure to a mild-stressor could help the cow to better handle a challenging and mildly stressful situation whereas unpredictable exposure could increase neophobia.

Keywords: stray voltage, dairy cow, unpredictability, chronic stress, behavior

INTRODUCTION

Electricity is essential to modern farming techniques and many electrically powered machines are used on farms. Leakage of current from these types of equipment, electric and magnetic induction or faulty connections between the electrical circuit and the earth can lead to the undesirable electrical phenomenon called stray voltage (review by Deschamps, 2002). Stray voltage, usually less than 10 V, can produce a low current which can flow through farm animals (Gustafson, 2003, Norell *et al.*, 1983). Conflicting evidence have been reported on the effects of stray voltage. Impaired production performances, increased health problems and behavioral modifications were described in cows housed in buildings where stray voltage was detected (review by Hultgren, 1990). However, most of the experiments performed on stray voltages in a controlled environment reported no effect on milk production (Gorewit *et al.*, 1992a, Gorewit and Scott, 1986, Lefcourt *et al.*, 1985, Reinemann *et al.*, 2002) and only few effects on behavior (Aneshansley *et al.*, 1992, Lefcourt, 1982, Lefcourt *et al.*, 1986) and stress physiology (Gorewit *et al.*, 1992b, Southwick *et al.*, 1992). Moreover, most of the experiments conducted in dairy cows were short term experiments (except Gorewit *et al.*, 1992a). The animals can be submitted to repeated exposure to stray voltage and it has already been observed in farm animals that repeated exposure to stressors can induce a chronic stress (for review Mormède *et al.*, 2007). In addition to physiological measurements, behavioral criteria are among the most sensitive criteria to highlight chronic stress and have been used to study the modification of the emotional reactivity of calves submitted to chronic social stress (Boissy *et al.*, 2001, Veissier *et al.*, 2001).

On farm, stray voltage can occur in a random manner and can be unpredictable for the animals (for review Hultgren, 1990). The unpredictability of a stressor can modify the behavior (*eg.* startle response, aggression) and the stress physiology (*eg.* increase in plasma cortisol) in rats (for review Bassett and Buchanan-Smith, 2007 124), and is known to modulate the animal response to the stressor (for review Weinberg and Levine, 1980 589). Similarly, changes in the predictability of positive events such as feeding can affect the welfare of farm animals. Indeed, pigs receiving a diet in an unpredictable way showed more agonistic behaviors (competition at the trough and conspecific butting) compared to when feeding was performed in a predictable way (Carlstead, 1986 323). However, in most of the experiments on stray voltage, the electric stressor was applied in a predictable way which allowed the animals to become habituated to voltage exposure (Gorewit *et al.*, 1985, Henke Drenkard *et al.*, 1985). While an electric stressor occurring in a predictable way may allow the animal to expect its occurrence and eventually to adapt, the same stressor occurring in an unpredictable way may be more stressful (Quirce *et al.*, 1981).

The aim of this experiment was to investigate how random or permanent exposure to voltage on the water trough affected the behavior and the stress physiology of dairy cows. Specific behavior at the trough and emotional reactivity were studied to evaluate short and medium-

term adaptation of the animals to the voltage. The results on performance and stress physiology have been presented elsewhere (Rigalma *et al.*, soumis-a).

MATERIAL AND METHODS

The scientist in charge of the experiments was licensed to perform experiments on animals and the staff who applied the experimental procedures has attended a special course approved by the French Ministry of Agriculture.

Animals, Feeding, Management and Housing

Animals. Eighty-six Holstein cows in production were assigned to one of three treatments before the learning procedure according to their milk yield, parity and stage of lactation (divided into three groups: ≤ 60 days, from 61 to 180 days and ≥ 181 days post-calving). Eleven cows were discarded during the learning procedure because of high stress responses in the watering stall or difficulties to learn to use correctly the watering device. One cow had to be removed due to health problems in week 2 (data of this cow were discarded). One cow was removed in week 6 due to a fall on the slatted floor that led to a severe lameness (data of this cow were used until week 6 included). Therefore, 74 cows were used during the 8-wk experimental period.

Feeding and management. Cows were milked twice-daily at 0700 and 1700 h. A total mixed ration (TMR, dry matter basis: 43% corn silage, 17% rapeseed meal, 13% sugar beet pulp, 11% brewery byproduct, 11% alfalfa hay, 3% high moisture corn and 2% vitamins and minerals) was given at 0930 h and refusals were pushed towards the cows at 1800 h. Hay and salt licks were available *ad libitum*.

Housing. The animals were housed in the same enclosure (27m \times 14m, l \times w, for the first period (see below), n=26; 35m \times 14m, l \times w, for the second period, n=48) consisting of a straw bedded area and a slatted floor area for feeding. Six individual watering stalls were placed on a concrete area of approximately 60m², (figure 1). The watering stalls consisted of a stall (1m \times 3m, w \times l) equipped with a gate giving access to a water trough. The electromagnetic opening and closure of the gate was activated by an electronic key located around the neck of each cow and detected by an antenna located in the gate, so that each cow only had access to two watering stalls which were programmed according to its treatment. The stalls were made from plain wood panels, visually and electrically insulated from each other. The water troughs were electrically insulated from all the metallic parts of the pen and were equipped with a water meter. In addition, each trough was equipped with dividers in wood to visually isolate the animals and to prevent access to water by animals located in the neighbouring stalls. An aluminum plate (1m \times 2.5m, w \times l), insulated from all the other metallic parts and isolated from the ground, was placed on the floor of each stall. Cows of

each treatment had only access to two stalls. For each repetition, water stalls were randomly allocated to each treatment. EDF R&D (Electricité de France Research & Development) provided the electricity exposure system (alternating 50 Hz voltage).

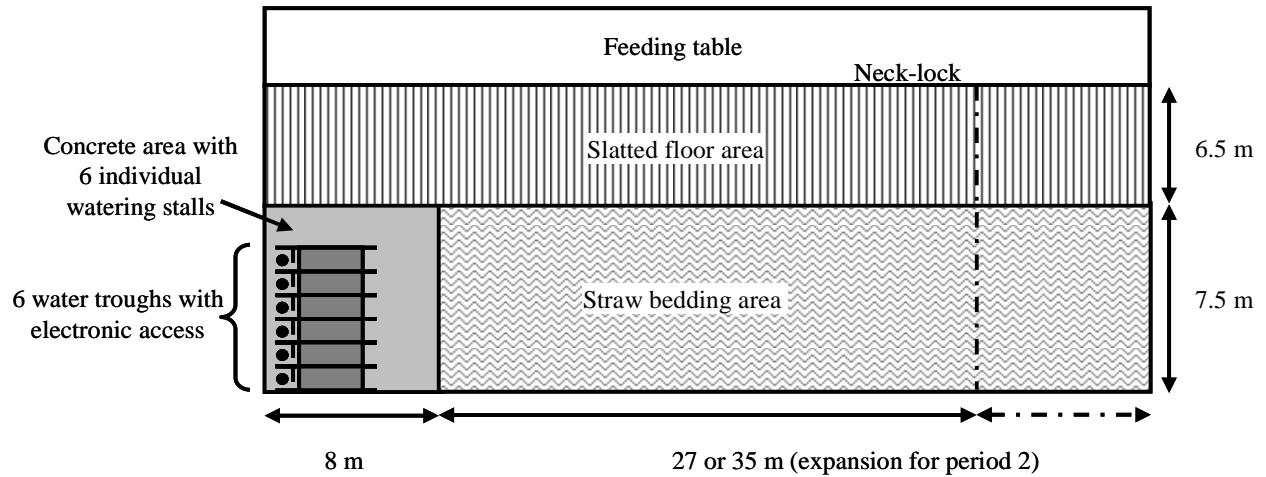


Figure 1. Experimental apparatus used to study the effects of an 8-week exposure to voltage on behavior, stress physiology and milk production in Holstein cows.

Treatments

The experiment was conducted in 2 periods with different animals each time: the first period from December to February and the second period from March to May. Each period consisted of three identical phases: i) four weeks of learning and habituation to the watering device and to the experimental procedures such as wearing a cardiac belt, ii) two weeks of recording of the basal level of each animal (called basal period or week 0 hereafter) and iii) eight weeks of exposure to voltage applied to a water trough (weeks 1 to 8). Voltage was applied via the water trough to the aluminum plate placed on the floor of the stall in order to obtain a voltage pathway through the cow from the muzzle to the four hooves. A voltage of 1.8 V was chosen because it was the level of voltage which has been shown to induce a permanent modification in behavior during a short term choice experiment (Rigalma *et al.*, submitted). During the 8-week voltage exposure period, a voltage of 1.8V was applied to the two water troughs assigned to each treatment: either permanently (PERM, n=23; n=8 for the first period and n=15 for the second period), or randomly, 36h a week with a duration of exposure varying from 4 hours up to 16 hours (RAND, n=25; n=10 for the first period and n=15 for the second period). Twenty-six cows (CONT; n=8 for the first period and n=18 for the second period) were used as control animals and were never exposed to voltage.

Behavioral Measurements

Time-Budget. Forty-six cows (PERM, n=15; RAND, n=16 and CONT, n=15) were individually observed between 1000 and 1200 h and between 1400 and 1600 h (period during which nearly 25% of daily visits to the trough are observed in basal period) with scan sampling using intervals of 10-min during the basal period (2 days), the first day and third day of week 1 (W1D1 and W1D3, respectively), week 2 (2 days, W2) and week 8 (2 days, W8). The following variables were measured for each cow individually: the proportion of scans (%) spent lying, eating TMR and ruminating (lying or standing), expressed as a percentage of activity per 4h of observation.

Drinking Behavior. Three digital cameras connected to three time-lapse VCRs were placed above each couple of troughs to record continuously the cow's behavior in the watering stall. All video files were encoded and analyzed using The Observer[®] Software System for Behavioral Research (Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands). Drinking behavior was observed continuously 24h/day during the basal period (average of 2 days), the first and third days of week 1 (W1D1 and W1D3, respectively), one day of week 2 (W2) and one day of week 8 (W8). Only the visits allowing access to the trough were kept for the analysis of drinking behavior (n=2244 visits). The number of visits per day, the number of visits with at least one sudden movement (a raise up of the head, head-shaking movement or a sudden backward movement while drinking), the number of visits with at least one lapping, the number of visits with at least one sniffing of the trough, the quantity of water drunk per visit and the latency to drink after entering the stall were recorded. The number of inappropriate visits (visiting a stall in which the watering trough was not accessible because associated to another treatment) was recorded and divided by the total number of visits (including visits without access to the trough, n=2940).

Motivation and novel object tests. In week 6 (W6), the cows were tested individually to appreciate their motivation to drink in their watering stall. The cows were restricted in a neck-lock and progressively released to be tested in triplets. The test took place between 1300 h and 1430 h. The watering stalls were not accessible for 5 hours before the beginning of the test. Three cows (one cow of each treatment) were driven to the front of a large gate situated 17 m from the watering stalls. After 15 seconds, the gate was opened and the cows had access to the watering stalls. The test was stopped 10 min after the gate crossing. The following day, the cows were tested again with the same procedure but in addition a novel object (a 20 cm-high plastic bottle with stripes of contrasting colors) was hanged in the middle of the entrance of the stalls, 1.5m high.

The tests were video recorded, encoded and analyzed using The Observer[®]. The latency to reach the trough after crossing the gate and the quantity of water drunk were recorded for each cow. Additional variables for the novel object test were recorded: the latency for the first

interaction with the object after crossing the gate (either sniffing, licking or butting) and the number of interactions with the object.

Physiological Measurements

Heart rate. Heart rate measurements were performed on 46 cows (PERM, n=15; RAND, n=16 and CONT, n=15) during the basal period (average of 2 days), the first day of week 1 (W1D1), during week 2 (average of 2 days, W2) and during week 8 (average of 2 days, W8). The heart rate (HR) monitor used consisted of a watch receiver (Polar® S610i, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) and two electrodes (Horse Trainer transmitter Polar®, Fleurier, Switzerland) fitted on an elastic belt adjusted to the thorax size of the cows. The positive electrode was placed on the right flank of the animal at 20 centimeters below the dorsal line. The negative electrode was placed on the left flank above the joint of the left forelimb. The contact between electrodes and skin was improved by small amounts of ultrasound gel smeared on the chest. The belt and the electrodes were placed on the animals at 0800 h and removed at 1600 h. The heart rate monitor works by averaging the R-R intervals of the QRS electrocardiogram wave complex over 5-s periods as detailed by (Karnoven *et al.*, 1984). This procedure was used previously in cows by Hopster and Blokhuis (1994) and Rushen *et al.* (2001). After completion of data collection, the equipment was removed and the Polar® S610i was downloaded by IR communication via a Polar® Interface onto a computer via the software Polar Equine version 4.0 (Polar Electro Oy, Kempele, Finland). The mean heart rate per animal per day was calculated. In addition, by synchronizing the drinking behavior video analysis to the heart rate data, the mean heart rate during drinking was calculated. All heart rate data are given in beats per minute (bpm).

Water Intake

A digital camera placed above the six water meters was connected to a HDD recorder. Records were performed 24h/day (1 frame per second) during the basal period (average of 2 days), W1D1, W1D3, W2 (1 day) and W8 (1 day). By synchronizing the drinking behavior video analysis to the water meter video recording, the mean amount of water drunk per visit was calculated.

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using the GLM procedure of SAS® (Statistical Analysis System software, SAS Institute, version 9.1.3) with comparison of the estimates (*t*-test based). Data were analyzed with the following model:

$$Y_{ijkl} = \mu + T_j + P_k + R_l + T_j * P_k + BW_i + cov_i + e_{ijkl}$$

where Y_{ijkl} represents the dependent variable; μ = overall mean; T_j = fixed effect of the treatment j with 3 modalities (CONT, PERM and RAND); P_k = fixed effect of the period k with 2 modalities (period 1 and 2); R_l = fixed effect of the parity with 3 modalities (1, 2 and > 2); $T_j * P_k$ = interaction between the treatment j and the period k ; BW_i = the body weight of the animal i as a covariate; cov_i = pre-experimental covariate (mean value per cow for each variable obtained during the 2-wk of basal period) and e_{ijkl} the residual error.

In order to compare the behavior of RAND cows with or without electricity, the same model was used but with only two modalities for T_j (voltage exposure vs. no voltage).

When assumptions of homogeneity of variance and normal distribution of the residuals were not verified, a log, inverse or square root transformation was performed before carrying out the analysis. When normal distribution of the residuals and homogeneity of variance were still not verified after transformations a Kruskal-Wallis one-way analysis of variance (for k independent samples) was performed (Siegel and Castellan, 1988). For post-hoc comparisons Mann-Whitney U test was performed.

Qualitative data such as the number of inappropriate visits and the number of visits with at least one sudden movement, one lapping and one sniffing of the trough were analyzed with a Chi-square test.

LSMeans \pm s.e. are presented when GLM procedure was conducted while means \pm s.e. are presented for non-parametric analyses.

Due to practical problems, the data for the time-budget from the first period could not be included in the analysis of week 2.

RESULTS

Behavioral Measurements

Time-budget. In W1D1, W1D3, W2 and W8, no treatment differences were observed on the percentage of time spent ruminating.

A trend for a treatment effect was found on the percentage of time spent lying in W1D3 and W8 ($P \leq 0.086$) and an effect was found in W2 ($P = 0.014$). In W1D3, PERM cows spent less time lying than RAND cows ($P = 0.030$) (47.8 ± 6.79 % and 67.6 ± 3.40 %, 59.6 ± 7.33 %, for PERM, RAND and CONT cows, respectively). In W2, PERM cows spent less time lying than CONT and RAND cows (49.3 ± 5.15 %; 67.9 ± 3.29 %; 64.0 ± 2.99 %, for PERM, RAND and CONT cows, respectively, $P \leq 0.028$). In W8, RAND cows tended to spend more time lying than CONT cows ($P = 0.085$) and spent more time lying than PERM ($P = 0.031$) (55.5 ± 4.95 %; 71.0 ± 1.60 %; 61.6 ± 4.41 %, for PERM, RAND and CONT cows, respectively) while no more differences were observed between CONT and PERM cows.

An effect of treatment on the percentage of time spent eating was found in W2 ($P = 0.014$): RAND cows spent less time eating than CONT and PERM cows (21.4 ± 3.16 %, 10.3 ± 1.68 %, 18.6 ± 2.35 %, for PERM, RAND and CONT cows, respectively, $P < 0.02$).

Drinking Behavior (table 1). A treatment effect was observed for the number of visits to the water trough per day in W1D1 ($P = 0.049$) and a trend in W1D3 ($P = 0.095$) (table 1) but not in W2 and W8. In W1D1, PERM cows visited more ($P = 0.016$) and RAND cows tended to visit more the water trough ($P = 0.083$) than CONT cows. In W1D3, PERM and RAND cows tended to visit more the water trough than CONT cows ($P \leq 0.057$).

A treatment effect was observed on the number of visits with at least one sudden movement in W1D1 and W2 ($P \leq 0.014$), but not in W1D3 and W8 (table 1). In W1D1, PERM and RAND cows made more visits with at least one sudden movement than CONT cows ($P \leq 0.006$). In W2, PERM cows made more visits with at least one sudden movement than CONT cows ($P = 0.014$).

In W1D1 and W1D3, an effect of treatment was observed on the number of inappropriate visits ($P < 0.001$). A trend was still found in W2 ($P = 0.052$) while in W8, no more differences were observed. PERM cows made more inappropriate visits compared to CONT cows and RAND cows in W1D1 and W1D3 ($P < 0.001$). In W2, PERM cows made more inappropriate visits compared to CONT cows ($P = 0.029$) and tended to make more inappropriate visits than RAND cows ($P = 0.063$).

In W1D1, W1D3, W2 and W8 an effect of treatment was observed on the number of visits with at least one lapping ($P < 0.001$). In W1D1, W1D3 and W2, PERM cows made less visits with at least one lapping than CONT and RAND cows ($P < 0.001$), RAND cows made less visits with at least one lapping than CONT cows ($P \leq 0.005$). In W8, PERM and RAND cows made less visits with at least one lapping than CONT cows ($P < 0.001$) but no differences were observed between PERM and RAND cows.

In W1D1, W1D3, W2 and W8 an effect of treatment was observed on the number of visits with at least one sniffing of the trough ($P \leq 0.002$). In W1D1 and W1D3, PERM and RAND cows made a higher number of visits with at least one sniffing of the trough than CONT cows ($P < 0.001$). In W2, PERM cows made a higher number of visits with at least one sniffing of the trough than CONT and RAND cows ($P < 0.001$) but no differences between RAND and CONT cows were observed. In W8, RAND cows made a higher number of visits with at least one sniffing of the trough than CONT and PERM cows ($P \leq 0.007$).

A treatment effect was observed for the latency to drink in W1D1 and W8 ($P \leq 0.039$), but not in W1D3 and W2 (table 1). In W1D1, PERM cows had a greater latency to drink than CONT cows ($P = 0.010$) while in W8, PERM and RAND cows had a smaller latency to drink than CONT cows ($P \leq 0.045$). In addition, a treatment effect was observed on the time spent drinking in W1D1 ($P = 0.039$): PERM and RAND cows spent less time drinking than CONT cows ($P \leq 0.036$). Water intake per visit was also modified by the treatments in W1D1 ($P =$

0.047), and tended to be modified in W1D3, W2 and W8 ($P \leq 0.092$). In W1D1, PERM cows tended to drink less and RAND cows drank less per visit than CONT cows ($P = 0.093$, $P = 0.016$, respectively). This effect was still present in RAND cows in W1D3, W2 and W8 with a smaller water intake per visit than CONT cows ($P = 0.085$, $P = 0.040$ and $P = 0.031$; respectively).

Physiological Measurements

In W1D1, an effect of treatment was observed on the mean heart rate per day ($P = 0.013$): PERM and RAND cows had a higher mean heart rate than CONT cows (88 ± 2.5 bpm, 86 ± 2.2 bpm, 79 ± 1.9 bpm, for PERM, RAND and CONT cows, respectively, $P < 0.023$). No differences between treatments were observed in W2 and W8.

In W8, a treatment effect was observed ($P = 0.023$): RAND cows had a higher mean heart rate during drinking than CONT cows and PERM cows (84 ± 4.8 bpm, 102 ± 4.1 bpm, 88 ± 2.5 bpm, for PERM, RAND and CONT cows, respectively, $P \leq 0.017$). No differences between treatments were observed on the mean heart rate during drinking in W1D1, W1D3 and W2.

Behavior of RAND cows

In W1D1, RAND cows spent more time sniffing the trough (log back-transformed data: 6.3 ± 1.02 s and 3.8 ± 0.51 s, respectively, $P = 0.010$) and presented a greater latency to drink (log back-transformed data: 51.8 ± 9.67 s and 20.2 ± 3.24 s, respectively, $P < 0.001$) when voltage was applied to the water trough compared to when no voltage was applied.

In W8, RAND cows spent more time drinking when voltage was applied to the water trough compared to when no voltage was applied (161.5 ± 10.16 s and 116.3 ± 10.16 s, respectively, $P = 0.002$).

Whatever the week, no differences were observed on the time spent lapping whether voltage was applied or not.

Motivation Test.

No differences between treatments were observed on water intake and on the latency to drink.

Novel object Test.

An effect of treatment was observed on the latency to drink ($P = 0.033$) and to interact with the object ($P = 0.025$) and a trend was observed for the number of interactions with the object ($P = 0.051$). PERM and RAND cows were faster to drink than CONT cows ($P = 0.013$) (log back-transformed data: 52 ± 15.7 s, 67 ± 14.3 s, 134 ± 38.7 s, for PERM, RAND and CONT cows, respectively, $P \leq 0.037$). PERM cows were faster to interact with the object compared to CONT and RAND cows ($P \leq 0.039$, figure 2). RAND cows performed less interactions with the object than CONT cows ($P = 0.021$, figure 2) and tended to perform less interaction than PERM cows ($P = 0.077$, figure 2).

No differences between treatments were observed on water intake.

Chapitre 3- Effets des courants électriques chez les bovins

Table 1. Drinking behavior of Holstein cows submitted to an 8-week voltage exposure (1.8V applied to the water trough) permanently (PERM, n=23), randomly (36h/week, RAND, n=25) or to no voltage exposure (CONT, n=26). Behavioral measurements were performed during day 1 and day 3 of week 1 (W1D1 and W1D3, respectively), during week 2 (W2) and week 8 (W8)

Item		CONT		PERM		RAND		P treatment
number of visits per day	W1D1 [*]	5.9 ^a	± 0.51	8.1 ^b	± 0.89	7.3 ^(b)	± 0.67	0.049
	W1D3	5.4 ^a	± 0.57	7.0 ^(b)	± 0.56	6.9 ^(b)	± 0.52	0.095
	W2	5.8	± 0.47	6.2	± 0.46	7.0	± 0.43	0.157
	W8	4.9	± 0.33	5.0	± 0.34	5.6	± 0.30	0.247
latency to drink per visit (s) [#]	W1D1	28.2 ^a	± 5.49	44.7 ^b	± 6.13	35.7 ^{ab}	± 5.76	0.025
	W1D3	22.4	± 2.45	25.4	± 4.74	24.5	± 3.90	0.972
	W2	24.4	± 2.81	26.0	± 5.31	23.0	± 2.63	0.633
	W8	22.5 ^a	± 3.52	21.9 ^b	± 8.54	15.5 ^b	± 2.53	0.039
time spent drinking per visit (s)	W1D1 [#]	173.7 ^a	± 10.06	140.3 ^b	± 14.50	136.3 ^b	± 13.00	0.039
	W1D3 ⁺	136.3	± 9.81	163.3	± 11.69	137.3	± 9.10	0.109
	W2 ⁺	143.6	± 7.88	159.8	± 8.72	141.0	± 7.13	0.187
	W8 ⁺	139.9	± 7.78	142.1	± 8.38	142.0	± 7.25	0.974
water intake / visit (liters) [#]	W1D1	17.0 ^a	± 0.83	14.6 ^(b)	± 1.44	13.6 ^b	± 1.08	0.047
	W1D3	16.3 ^a	± 0.94	18.9 ^(a)	± 1.92	13.6 ^b	± 0.97	0.072
	W2	17.1 ^a	± 1.03	16.8 ^(a)	± 1.22	14.0 ^b	± 0.80	0.075
	W8	18.1 ^a	± 0.83	17.1 ^{ab}	± 1.22	15.5 ^b	± 0.97	0.092
number of inappropriate visits/ total number of visits	W1D1	21/162 ^a		83/240 ^b		45/242 ^a		< 0.0001
	W1D3	21/141 ^a		53/164 ^b		11/171 ^c		< 0.0001
	W2	12/142 ^a		24/140 ^b		18/179 ^(a)		0.052
	W8	4/120		5/106		8/139		0.653
number of visits with at least one sudden movement/ number of visits with access to the trough	W1D1	1/119 ^a		14/147 ^b		13/160 ^b		0.011
	W1D3	2/120		6/104		6/147		0.449
	W2	0/130 ^a		7/115 ^b		2/140 ^(a)		0.019
	W8	1/116		2/99		0/130		0.586
number of visits with at least one lapping / number of visits with access to the trough	W1D1	96/119 ^a		63/147 ^b		104/160 ^c		< 0.001
	W1D3	92/120 ^a		34/104 ^b		89/147 ^c		< 0.001
	W2	103/130 ^a		32/115 ^b		85/140 ^c		< 0.001
	W8	81/117 ^a		31/99 ^b		48/130 ^b		< 0.001
number of visits with at least one sniffing of the trough/ number of visits with access to the trough	W1D1	21/119 ^a		136/147 ^b		100/160 ^c		< 0.001
	W1D3	28/120 ^a		69/104 ^b		64/147 ^c		< 0.001
	W2	30/130 ^a		61/115 ^b		32/140 ^a		< 0.001
	W8	27/117 ^a		25/99 ^a		55/130 ^b		0.002

[#]: data analyzed with non-parametric tests, ^{*}: inverse transformation, ⁺ log transformation. ^{a, b}: values with different superscripts differ ($P < 0.05$); ^{(a), b}: values with superscripts within brackets ^(a) tend to differ from values with superscript ^b ($P < 0.10$).

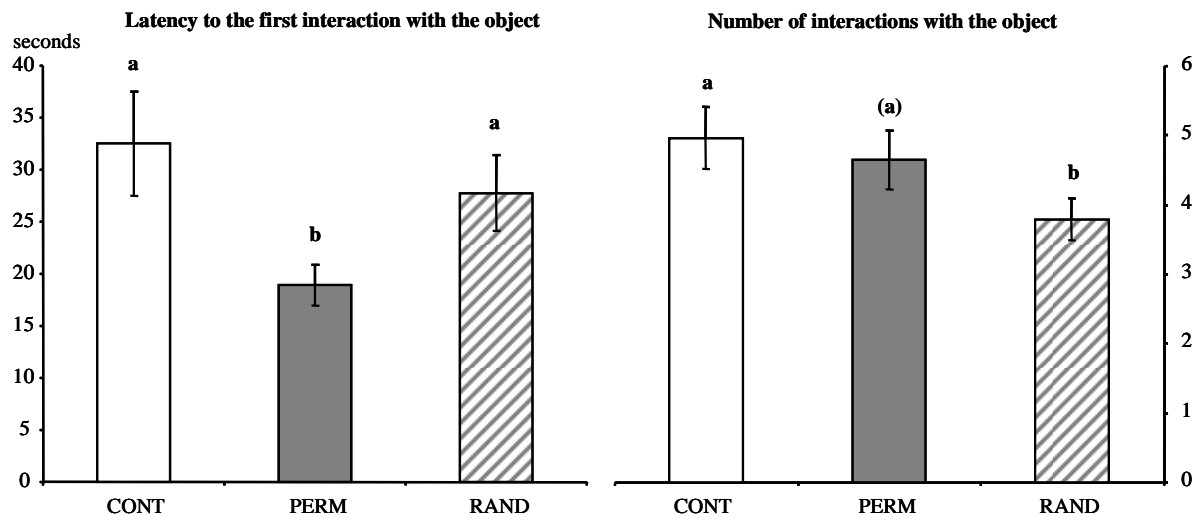


Figure 2. Latency to the first interaction (seconds) and number of interactions with the object during a novel object test (plastic bottle hung above the entrance of the watering stall) of cows exposed to voltage (1.8V applied to the water trough) permanently (PERM, n=23), randomly (36h/week, RAND, n=25) or to no voltage (CONT, n=26) after 6 weeks of treatment.

DISCUSSION

The aim of this experiment was to study the medium-term effects of stray voltage in dairy cows using a precise observation of behavior and heart rate measurements. The cows were exposed to 1.8 V in a permanent (predictable) or in a random (unpredictable) way on the water trough during 8 weeks. Measurements of behavior were performed at different time scales in order to study acute and chronic effects of stray voltage.

On the first day of exposure, permanent and random exposure to voltage on the water trough induced an increase in the latency to drink, and a decrease in water intake per visit compared to control cows. Moreover, the cows exposed to voltage made more visits per day to the water trough and a higher number of visits with sudden movements than control cows. Some of these behaviors were still observed on the third day of the first week and on the second week. In addition, a higher mean heart rate per day was recorded the first day of exposure in cows exposed to voltage compared to control cows. These results seem to indicate the presence of an acute stress response. Indeed, the increase in heart rate has been used as an indicator of acute stress in cows submitted to veterinary routine procedures (Waiblinger *et al.*, 2004), during a change of side at milking (Hopster *et al.*, 1998) or after isolation (Piller *et al.*, 1999). In addition, this increase in daily mean heart rate is in agreement with the observations of Lefcourt *et al.* (1985, 1986) and Gorewit and Scott (1986) who recorded an increase in heart rate from +3 to +30 bpm during the first exposure to a current of 3.6 or 12.5 mA (from right rear hock to right front knee, or at the level of the spine, respectively). Sudden movements can be interpreted as a response of startle in cattle as already observed in cows exposed to a water

spray (Gibbons *et al.*, 2009 739). The head-shaking movement (included in sudden movements) was also observed during a negative stroke of a specific area of the body of a cow (Schmied *et al.*, 2008 662). These behaviors reflect the negative character of voltage exposure or at least some startle response due to the current flowing through the body. The higher number of visits with at least one sniffing of the trough the 1st day, the 3rd day and the 2nd week in the cows permanently exposed to voltage could indicate that the cows were exploring their environment and perceived a change (the presence of the voltage) as previously observed in cows exposed to novel stimuli (novel food, novel object or unfamiliar person) (Herskin *et al.*, 2004). The absence of difference with control cows in sniffing in the 8th week could indicate that at this time, the voltage had lost its novelty component which has an aversive value in farm animals (Boissy, 1995). Thus the cows probably got habituated to the voltage.

The cows permanently exposed to voltage spent less time lying than control cows the second week of exposure but not anymore in the 8th week. On the opposite, cows randomly exposed to voltage spent more time lying than control cows in the 8th week. A modification of daily rhythm of activity has been reported in calves and heifers exposed to repeated regrouping and relocation (Raussi *et al.*, 2005, Veissier *et al.*, 2001). Exposure to voltage could have transiently modified the time-budget in cows permanently exposed to voltage and on a longer term in cows randomly exposed to voltage. However, this result should be relativized due to the 4-h study which is not representative of the 24-h daily activity.

The higher number of inappropriate visits of the cows exposed permanently to voltage until the second week of exposure compared to control cows and to cows exposed to a random exposure to electricity probably indicates that the cows tried to avoid electricity, even if this solution was not successful because of the non-opening of the other treatment gates. This observation is in agreement with the comment of Brugère (2002) who stated that the animals avoided the place where the electric stressor was found in a farm affected by stray voltage. In order to adapt to the voltage, the cows permanently exposed to voltage made less visits with at least one lapping from the first day of exposure. The reduction in lapping could be explained by the fact that, in cows, the tongue is a wet and muscular organ richly innervated and vascularized (Bressou, 1978) and which could provide a preferred pathway for electric current (Gabriel *et al.*, 1996). Through lapping, the tongue is more exposed to the electrified trough, the resistance of the contact point is reduced and the amount of current flowing through the body is increased. Therefore, reducing lapping could be a behavioral strategy to reduce the current crossing the body. A modification in behavior has sometimes been reported in cows exposed to stray voltage in order to reduce the aversiveness of stray voltage: Reinemann *et al.* (2005) observed that cows exposed to a current (peak from 7 to 20 mA) on their water bowl modified their drinking behavior by submerging their entire muzzle in the drinking bowl. The authors hypothesized that this behavior could provide a larger contact surface and reduce the

maximum local current density in the muzzle. In pigs, Valiquette *et al.* (1994) observed a modification in the snout position in the water trough which they interpreted as a strategy to increase the resistance of the contact point and therefore to reduce the amount of current flowing through the animal's body.

However, at the end of the 8-wk experimental period, drinking behavior was not different anymore between cows exposed permanently to the current and control cows. This result is in agreement with the observations of Gorewit *et al.* (1985) and Henke Drenkard *et al.* (1985) who observed an habituation to an electric stressor in cows after 4 and 7 days of exposure, respectively. Some modifications of behavior were still observed in the cows randomly exposed to voltage compared to control cows in the 8th week such as the decrease in the latency to drink, the decrease in water intake per visit and in the number of visits with at least one sniffing of the trough compared to control cows. In addition, the higher heart rate recorded while drinking on the 8th week tends to show that the cows exposed to random voltage still showed a stress response and did not habituate to the voltage. On farm, stray voltage is an intermittent and random phenomenon, which makes it unpredictable for the animals (Deschamps, 2002). In our experiment, the unpredictability seemed to be more disruptive to the animals than permanent application of voltage. Studies on stress in livestock indicate that the response of an animal to its environment does not depend on the situation itself but rather on the interpretation that the animal makes of this situation (Boissy *et al.*, 2007). Predictability is one of the criteria which would allow the animal to assess a situation (Désiré *et al.*, 2002): indeed, sheep subjected to a predictable startling event were less stressed than sheep for which the event was unpredictable (Greiveldinger *et al.*, 2007). Pigs submitted to an unpredictable feeding regimen showed a higher frequency of aggression compared to pigs fed in a predictable way (Carlstead, 1986). These results may explain why, on farm, stray voltage, which is most of the time unpredictable for the animals, may be more aversive than stray voltage which is permanently applied during experiments (*i.e.* in a predictable way) (for review Hultgren, 1990).

The novelty of a stimulus is one of the criteria used by animals to assess their environment (Désiré *et al.*, 2002). However, reactivity to novelty may be modified if animals are submitted to chronic stress. Our initial hypothesis was that the cows chronically exposed to the electric stressor would be more disturbed by a novel object than control cows, and would present a hyper-reactivity as observed in calves chronically stressed (Boissy *et al.*, 2001). However, on the contrary to what was expected, cows permanently exposed to voltage were faster to interact with the novel object and quicker to drink (after passing close to the object) compared to control cows whereas cows exposed to unpredictable voltage interacted less with the object. This difference may result from three mechanisms: either a change in the motivation to drink, or an increase in exploratory behavior and a decrease in reactivity to arousal events in the environment. Results from the first motivation test showed that cows exposed

permanently or randomly to voltage did not differ for the latency to reach the trough after crossing the gate and for the quantity of water drunk compared to control cows, thus refuting the hypothesis of a change in the motivation to drink. Results from the second test in presence of the novel object probably reflects an increase exploratory behavior and a reduced neophobia (Herskin *et al.*, 2004) in cows exposed permanently to voltage compared to control cows. On the other side, exposing chronically cows to an unpredictable mild stressor seemed to reduce their exploratory behavior. Therefore, chronic exposure to a mild stressor, *i.e.* permanent exposure to 1.8 V on the water trough, could allow the cows to better handle a subsequent mildly stressful situation. Similar effects were observed in lambs with past experience of a mild stressor (chronic exposure to unpredictable 3.5 V on their water trough during 6 weeks) which handled better a challenging and mildly stressful situation (Rigalma *et al.*, 2009).

CONCLUSION

Permanent exposure to 1.8 V induced an acute stress response during the first days of exposure. However, the cows seemed to habituate to the stressor from the second week of exposure, and, on the medium-term, to better handle a challenging situation. The unpredictable exposure to stray voltage led to an acute stress response the first day but the cows did not seem to habituate to the stressor after 8 weeks of exposure even if the cows adapted their behavior. If it is experienced in an unpredictable way, stray voltage can be considered as a potentially mild-stressor, delaying the habituation of the animals to the stressor.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank D. Tristant and the staff of the Experimental Farm of AgroParisTech for the care of the animals, F. Fortin and J.P. Gernez (EDF R&D) for the electricity exposure system and RTE for financial support.

REFERENCES

- Aneshansley, D. J., R. C. Gorewit, and L. R. Price. 1992. Cow sensitivity to electricity during milking. *J. Dairy Sci.* 75(10):2733-2741.
- Bassett, L. and H. M. Buchanan-Smith. 2007. Effects of predictability on the welfare of captive animals. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 102(3-4):223-245.
- Boissy, A. 1995. Fear and Fearfulness in animals. *The Quaterly Review of Biology* 70:165-191.
- Boissy, A., C. Arnould, E. Chaillou, V. Colson, L. Desire, C. Duvaux-Ponter, L. Greiveldinger, C. Leterrier, S. Richard, S. Roussel, H. Saint-Dizier, M. C. Meunier-Salaün, and D. Valance. 2007. Emotion and cognition: a new strategy to achieve animal welfare. *INRA Prod. Anim.* 20(1):17-21.

- Boissy, A., I. Veissier, and S. Roussel. 2001. Behavioural reactivity affected by chronic stress: An experimental approach in calves submitted to environmental instability. *Anim. Welf.* 10:S175-S185.
- Bressou, C. 1978. Anatomie régionale des animaux domestiques. II Les ruminants. Paris (France).
- Brugère, H. 2002. Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage. *Bull. Soc. Vet. Prat. France* 86(3):182-196.
- Carlstead, K. 1986. Predictability of feeding: Its effect on agonistic behaviour and growth in grower pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 16(1):25-38.
- Deschamps, F. 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bull. Soc. Vet. Prat. France* 86(3):174-181.
- Désiré, L., A. Boissy, and I. Veissier. 2002. Emotions in farm animals: a new approach to animal welfare in applied ethology. *Behav. Proc.* 60(2):165-180.
- Gabriel, S., R. W. Lau, and C. Gabriel. 1996. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Phys. Med. Biol.* 41(11):2251-2269.
- Gibbons, J., A. Lawrence, and M. Haskell. 2009. Responsiveness of dairy cows to human approach and novel stimuli. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 116(2-4):163-173.
- Gorewit, R. C., D. J. Aneshansley, and L. R. Price. 1992a. Effects of voltages on cows over a complete lactation .1. Milk-yield and composition. *J. Dairy Sci.* 75(10):2719-2725.
- Gorewit, R. C., D. J. Aneshansley, and L. R. Price. 1992b. Effects of voltages on cows over a complete lactation .2. Health and reproduction. *J. Dairy Sci.* 75(10):2726-2732.
- Gorewit, R. C. and N. R. Scott. 1986. Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* 69(4):1122-1127.
- Gorewit, R. C., N. R. Scott, and C. S. Czarniecki. 1985. Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *J. Dairy Sci.* 68(3):718-725.
- Greiveldinger, L., I. Veissier, and A. Boissy. 2007. Emotional experience in sheep: Predictability of a sudden event lowers subsequent emotional responses. *Physiol. Behav.* 92(4):675-683.
- Gustafson, R. J. 2003. Stray voltage overview. Pages 3-11 in *Stray voltage and dairy farms*. NRAES, Radisson Pen Harris Hotel and Convention Center Camp Hill, Pennsylvania.
- Henke Drenkard, D. V., R. C. Gorewit, N. R. Scott, and R. Sagi. 1985. Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* 68(10):2694-2702.

- Herskin, M. S., A. M. Kristensen, and L. Munksgaard. 2004. Behavioural responses of dairy cows toward novel stimuli presented in the home environment. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 89(1-2):27-40.
- Hopster, H. and H. J. Blokhuis. 1994. Validation of a heart-rate monitor for measuring a stress response in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 74(3):465-474.
- Hopster, H., J. T. N. van der Werf, and H. J. Blokhuis. 1998. Side preference of dairy cows in the milking parlour and its effects on behaviour and heart rate during milking. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 55(3-4):213-229.
- Hultgren, J. 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet. Res. Commun.* 14(4):287-298.
- Karnoven, J., J. Chwalbinka-Moneta, and S. Saynajakangas. 1984. Comparison of heart rate measured by ECG and microcomputer. *Physician Sportmed* 12:65-69.
- Lefcourt, A. M. 1982. Behavioral responses of dairy cows subjected to controlled voltages. *J. Dairy Sci.* 65(4):672-674.
- Lefcourt, A. M., R. M. Akers, R. H. Miller, and B. Weinland. 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *J. Dairy Sci.* 68(2):391-401.
- Lefcourt, A. M., S. Kahl, and R. M. Akers. 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *J. Dairy Sci.* 69(3):833-842.
- Mormède, P., S. Andanson, B. Auperin, B. Beerda, D. Guemene, J. Malmkvist, X. Manteca, G. Manteuffel, P. Prunet, C. G. van Reenen, S. Richard, and I. Veissier. 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol. Behav.* 92(3):317-339.
- Norell, R. J., R. J. Gustafson, R. D. Appleman, and J. B. Overmier. 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. ASAE* 26(5):1506-1511.
- Piller, C. A. K., J. M. Stookey, and J. M. Watts. 1999. Effects of mirror-image exposure on heart rate and movement of isolated heifers. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 63(2):93-102.
- Quirce, C. M., M. Odio, and J. M. Solano. 1981. The effects of predictable and unpredictable schedules of physical restraint upon rats. *Life Sci.* 28(17):1897-1902.
- Raussi, S., A. Boissy, E. Delval, P. Pradel, J. Kaihilahti, and I. Veissier. 2005. Does repeated regrouping alter the social behaviour of heifers? *Appl. Anim. Behav. Sci.* 93(1-2):1-12.
- Reinemann, D. J., M. D. Rasmussen, and S. D. LeMire. 2002. Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Trans. ASAE* 45(3):833-838.

- Reinemann, D. J., L. E. Stetson, N. E. Laughlin, and S. D. LeMire. 2005. Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Trans. ASAE* 48(1):385-392.
- Rigalma, K., C. Duvaux-Ponter, A. Barrier, C. Charles, A. A. Ponter, F. Deschamps, and S. Roussel. soumis-a. Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology and, milk production and composition in dairy cows. Submitted to *J. Dairy Sci.*
- Rigalma, K., C. Duvaux-Ponter, A. Oliveira, O. Martin, T. Louyot, F. Deschamps, and S. Roussel. soumis-b. Determination of a stray voltage threshold in Holstein heifers, influence of predictability and past-experience on behavioural and physiological responses. Submitted to *Anim. Welf.*
- Rigalma, K., S. Roussel, C. Charles, A. Malherbe, and C. Duvaux-Ponter. 2009. Does past-experience of a stressor enable sheep to handle more effectively a stressful situation? in 31st International Ethological Conference, 19-24 august, Rennes, France, 386.
- Rushen, J., L. Munksgaard, P. G. Marnet, and A. M. de Passille. 2001. Human contact and the effects of acute stress on cows at milking. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 73:1-14.
- Schmied, C., S. Waiblinger, T. Scharl, F. Leisch, and X. Boivin. 2008. Stroking of different body regions by a human: Effects on behaviour and heart rate of dairy cows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 109(1):25-38.
- Siegel, S. and N. J. Castellan. 1988. *Nonparametric statistics for the behavioural sciences.* Singapore.
- Southwick, L. H., D. J. Wilson, and P. M. Sears. 1992. Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one or two volts of alternating current. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 201(3):441-444.
- Valiquette, S., R. Bergeron, J. L. Geoffroy, G. P. Martineau, S. Robert, and J. J. Matte. 1994. Current and impedance in fattening pigs: effects of biological and environmental parameters. Page 10 in *International Winter Meeting, Atlanta (Georgia, USA).*
- Veissier, I., A. Boissy, A. M. de Passille, J. Rushen, C. G. van Reenen, S. Roussel, S. Andanson, and P. Pradel. 2001. Calves' responses to repeated social regrouping and relocation. *J. Anim. Sci.* 79(10):2580-2593.
- Waiblinger, S., C. Menke, J. Korff, and A. Bucher. 2004. Previous handling and gentle interactions affect behaviour and heart rate of dairy cows during a veterinary procedure. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 85(2):31-42.
- Weinberg, J. and S. Levine. 1980. Psychobiology of coping in animals: the effects of predictability. in *Coping and Health.* S. Levine and H. Ursin, ed. Plenum Press, New York, USA. Pages 39-59

Chapitre 4 - Discussion Générale

Comme nous l'avons vu au cours du chapitre introductif (chapitre 1), la présence des tensions électriques parasites en élevage est une question d'actualité qui interpelle de plus en plus le monde agricole. C'est dans ce contexte que cette thèse CIFRE a été mise en place. Quatre objectifs ont été fixés :

- évaluer, dans des conditions d'élevage, les effets à moyen terme d'une tension électrique sur le comportement, la physiologie du stress et les performances de production chez les ovins
- déterminer le seuil de réaction aux tensions électriques chez la génisse
- évaluer, dans des conditions d'élevage, les effets à moyen terme d'une tension électrique sur le comportement, la physiologie du stress et les performances de production chez la vache laitière
- étudier les conséquences de l'imprévisibilité des tensions électriques

1. Rappels des principaux résultats

Les principaux résultats obtenus au cours cette thèse sont présentés dans les tableaux 2, 3 et 4. La tension électrique a été appliquée au niveau de la mangeoire pour les génisses et au niveau de l'abreuvoir pour les agnelles, agneaux et vaches laitières.

Tableau 2. Réponses comportementales et physiologiques à court terme de génisses soumises à des tensions électriques et effets de l'expérience et de l'imprévisibilité.

Génisses		Comportement	Physiologie
Détermination du seuil de réaction Augmentation journalière de 0 à 5 V		<p>♦ A partir de 2 V (2,0 mA) :</p> <p>↗ fréquence de mouvements brusques</p> <p>↗ fréquence de léchages de museau</p> <p>♦ A partir de 2,3 V (2,6 mA) :</p> <p>↘ latence ingestion concentré dans mangeoire électrifiée</p> <p>↘ quantité ingérée dans mangeoire électrifiée</p>	<p>↗ concentration plasmatique en cortisol à 1 V (1,3 mA)</p> <p><i>Pas d'effet à 3 et 5 V</i></p>
Effet de l'expérience (3,3 V soit 2,9 mA)	Génisses naïves	<i>Pas d'effet</i>	↗ concentration plasmatique en cortisol lors de la 1 ^{ère} exposition
Effet de l'imprévisibilité (3,3 V)	Tension imprévisible (4 jours / 11)	<p>↗ temps passé à ingérer</p> <p>↗ quantité de concentré ingérée dans mangeoire électrifiée</p>	<i>Pas d'effet</i>

Tableau 3. Principales réponses physiologiques et performances de production d'agneaux soumis à une tension électrique répétée et effets de l'imprévisibilité. Les réponses comportementales et physiologiques des agnelles sont en cours de dépouillement.

Agneaux		Physiologie	Production
Tension prévisible (3,5 V soit 2,4 mA)	Réponse à court terme (1 ^{ère} semaine)	<i>Pas d'effet</i>	-
	Réponse à moyen terme (6 ^{ème} semaine)	<p>⬇ concentration plasmatique en cortisol à l'abattage</p> <p>↗ poids des médullosurrénales</p>	♦ Carcasses moins grasses dans classe R (bonne conformation)
Tension imprévisible (3,5 V, 34h/semaine)	Réponse à court terme (1 ^{ère} semaine)	<i>Pas d'effet</i>	-
	Réponse à moyen terme (6 ^{ème} semaine)	<i>Pas d'effet</i>	♦ Carcasses moins grasses dans classe R (bonne conformation)

Tableau 4. Principales réponses comportementales, physiologiques et performances de production de vaches laitières soumises à une tension électrique répétée au niveau de leur abreuvoir et effet de l'imprévisibilité.

vache laitière		Comportement	Physiologie	Production
Tension prévisible (1,8 V soit 3,6 mA)	Court terme (1 ^{ère} et 2 ^{ème} semaine d'exposition)	<ul style="list-style-type: none"> ↗ nombre de visites avec buvée ↘ nombre de visites avec lapement ↗ nombre de visites avec flairage ↘ temps passé à boire ↘ quantité d'eau bue par visite ↗ activité 	↗ fréquence cardiaque moyenne le 1 ^{er} jour	↘ ponctuelle (2 ^{ème} jour) de la production laitière
	Moyen terme (8 ^{ème} semaine d'exposition)	<ul style="list-style-type: none"> ↘ nombre de visites avec lapement ↘ latence pour aller boire après entrée dans la stalle 	♦ <i>Pas d'effet</i>	♦ <i>Pas d'effet</i> sur la production laitière, ni sur la qualité du lait
Tension imprévisible (1,8 V, 36h/semaine)	Court terme (1 ^{ère} et 2 ^{ème} semaine d'exposition)	<ul style="list-style-type: none"> ↗ nombre de visites avec buvée ↘ nombre de visites avec lapement ↗ nombre de visites avec flairage ↘ temps passé à boire ↘ quantité d'eau bue par visite 	<ul style="list-style-type: none"> ↗ fréquence cardiaque moyenne le 1^{er} jour ↗ concentration plasmatique en cortisol la 2^{ème} semaine 	↘ ponctuelle (3 ^{ème} jour) de la production laitière
	Moyen terme (8 ^{ème} semaine d'exposition)	<ul style="list-style-type: none"> ↘ nombre de visites avec lapement ↗ nombre de visites avec flairage ↘ latence pour aller boire après entrée dans la stalle ↘ quantité d'eau bue par visite ↗ activité en fin de journée 	<ul style="list-style-type: none"> ↗ fréquence cardiaque lors de la buvée ↗ concentration en cortisol du lait (la 8^{ème} semaine) 	♦ <i>Pas d'effet</i> sur la production laitière, ni sur la qualité du lait

2. Tensions électriques parasites, agent stressant modéré en élevage ?

2.1. Variables utilisées

Pour évaluer les réponses des animaux d'élevage (ovins et bovins) aux tensions électriques parasites, une approche multicritère a été adoptée. Cette approche, classiquement utilisée dans l'évaluation du bien-être en élevage, met en jeu des mesures simultanées de critères comportementaux, physiologiques, zootechniques et sanitaires. En réponse à un agent stressant, les critères comportementaux sont généralement plus sensibles que les critères physiologiques et zootechniques (Meunier-Salaün *et al.* 1987, revue de Veissier *et al.* 1999).

Les critères comportementaux utilisés au cours de cette thèse ont été de deux types : l'étude du comportement de l'animal au cours de sa vie quotidienne (comportement de buvée et rythme d'activité des animaux), et les réponses comportementales des animaux lors de tests spécifiques durant lesquels l'animal est confronté à une situation stressante comme l'isolement et la nouveauté. Ces tests spécifiques permettent d'exacerber les réponses de stress des animaux d'élevage dans des situations standardisées et d'évaluer la modification de leur réactivité émotionnelle (revue de Forkman *et al.* 2007). Les mesures fines du comportement réalisées tout au long des expérimentations ont permis d'étudier les réponses de stress aigu ainsi que les modifications comportementales engendrées par un stress chronique.

Au niveau des critères physiologiques, les réponses des axes catécholaminergique (fréquence cardiaque, activité des enzymes TH et PNMT impliquées dans la synthèse des catécholamines, poids des médullo-surrénales) et corticotrope (concentration en cortisol dans le plasma, le lait ou épreuve à l'ACTH) ont été étudiées afin d'identifier la présence d'un stress aigu ou chronique. L'ensemble des mesures effectuées est présenté dans le tableau 1 (chapitre 1 partie 2). Cependant, en présence de tensions électriques, les critères physiologiques de stress, comme par exemple l'augmentation du cortisol ou de l'adrénaline dans le sang, n'est pas toujours bien corrélée aux réponses comportementales des animaux (Lefcourt *et al.* 1986). Par ailleurs, même si l'augmentation de la fréquence cardiaque est souvent considérée comme un critère non invasif indirect pour mesurer la réponse de l'axe catécholaminergique (Désiré *et al.* 2006, Greiveldinger *et al.* 2007), elle est fortement dépendante de l'activité physique des animaux (Hopster et Blokhuis 1994).

Concernant les critères zootechniques, certains éleveurs ou acteurs proches de l'élevage mettent parfois en relation de mauvaises performances de production avec la présence de courants électriques parasites. Ces observations ont été rapportées en élevage porcin (Lasseret 2001, Martin 2008) et en élevage bovin laitier (Lasseret 2001, Dénès 2007). L'essentiel des attentes des éleveurs sur les effets potentiels des courants électriques parasites porte sur les critères zootechniques et sanitaires car ceux-ci sont directement liés aux performances technico-économiques de leur élevage. C'est pourquoi chez les vaches, nous avons mesuré la

production et la qualité du lait, et chez les moutons, leur croissance et la qualité des carcasses. Les critères zootechniques utilisés au cours de ces expérimentations ne doivent cependant pas être retirés de leur contexte d'obtention (spécificité de la Ferme Expérimentale d'AgroParisTech) et nous rappelons qu'il est important pour interpréter les réponses des animaux de disposer d'un lot d'animaux témoins.

2.2. Réponses comportementales et physiologiques à court terme

Au niveau physiologique, les génisses ont présenté une concentration en cortisol plus élevée suite à l'application d'une tension de 1 V (1,3 mA) que les génisses témoins alors que cette réponse n'était plus observée pour des tensions plus élevées (chapitre 3 partie 1). Chez la vache, la fréquence cardiaque moyenne était plus élevée uniquement lors du premier jour d'exposition à une tension électrique de 1,8 V (3,6 mA) (chapitre 3 partie 3) comparée aux témoins. Ces deux réponses pourraient être interprétées comme des réponses transitoires de stress aigu et sont cohérentes avec l'augmentation de la concentration plasmatique en cortisol observée chez la vache pour un courant de 8 mA au niveau de la mamelle (Henke Drenkard *et al.* 1985), chez la brebis pour un courant de 4 mA appliqué sur la patte antérieure (Przekop *et al.* 1985) et chez le porc pour un courant de 2,5 mA appliqué sur la patte postérieure (Ziecik *et al.* 1993). De même, l'exposition à des courants de 3,6 à 12,5 mA entre les membres antérieurs et postérieurs ou au niveau de la région lombaire ont entraîné une augmentation transitoire de la fréquence cardiaque chez la vache (Lefcourt *et al.* 1985, Gorewit et Scott 1986, Lefcourt *et al.* 1986). Cependant, quelques expérimentations n'ont pas mis en évidence de réponses physiologiques de stress aigu pour des niveaux de courants similaires à ceux qui ont été appliqués sur nos animaux : pas de modifications de la fréquence cardiaque, de la concentration plasmatique en catécholamines et en cortisol pour des courants de 2,5 à 7,5 mA appliqués au niveau de la mamelle (Lefcourt et Akers 1982), entre le genou antérieur droit et le sabot postérieur droit (Lefcourt *et al.* 1986), ou entre les sabots antérieurs et postérieurs des vaches (Reinemann *et al.* 2003).

Au niveau comportemental, plusieurs résultats laissent aussi supposer que les animaux ont eu des réponses transitoires de stress aigu lors des premières expositions aux tensions électriques. Un plus grand nombre de génisses ont réalisé des léchages de museau pour des tensions supérieures à 2 V (2,0 mA) ce qui peut être interprété comme un possible indicateur d'inconfort (Sawyer 1998, Sandem *et al.* 2002) (chapitre 3 partie 1). Plus de génisses ont également réalisé des mouvements brusques pour des tensions supérieures à 2 V, et les vaches ont réalisé plus de visites avec au moins un mouvement brusque le premier jour d'exposition, que ce soit avec une tension électrique appliquée de manière permanente ou aléatoire (chapitre 3 partie 3). Les mouvements brusques peuvent être interprétés comme une réponse de surprise chez les bovins (Gibbons *et al.* 2009). Ils peuvent également être interprétés comme un recul de l'animal pour éviter un stimulus désagréable. Enfin, le secouement de tête

(inclus dans les mouvements brusques) pourrait être interprété comme une réponse de menace légère envers ce stimulus désagréable (Simonsen 1979). Par ailleurs, les vaches soumises à une tension électrique en permanence ont eu un niveau d'activité (mesuré avec l'activité-mètre ALPRO) plus important en milieu de journée et en fin d'après-midi que les vaches témoins lors de la première journée d'exposition (chapitre 3 partie 2), ce qui pourrait traduire une réponse de stress comme cela a été montré chez des génisses réallotées (Raussi *et al.* 2005).

Ces réponses comportementales indiquent qu'une tension électrique de 1,8 V (3,6 mA) provoquerait un stress aigu transitoire chez les vaches lors des premières expositions. Cependant, il est important de rappeler que, lors des premières expositions à une tension électrique, il n'est pas possible, dans les réponses des animaux, de différencier l'effet nouveauté du stimulus de l'effet spécifique de l'électricité. La nouveauté du stimulus électrique est une composante importante dans la compréhension des réponses des animaux aux tensions électriques parasites.

2.3. Réponses comportementales et physiologiques à moyen terme

Les réponses physiologiques à moyen terme sont relativement limitées et ne sont pas retrouvées dans toutes les expériences. Ainsi, bien que le poids des médullo-surrénales ait été augmenté chez les agneaux soumis en permanence à une tension par rapport aux animaux témoins, aucune modification de leur fréquence cardiaque ou de l'activité des enzymes de synthèse des catécholamines n'a été observée (chapitre 2 partie 1). Chez les vaches laitières soumises à une tension de manière permanente, plus aucune réponse physiologique de stress n'a été observée lors de la 8^{ème} semaine d'exposition. Les animaux soumis à une tension de manière aléatoire ont présenté une augmentation de leur fréquence cardiaque lors de la buvée et une augmentation de la concentration en cortisol du lait lors de la 8^{ème} semaine de traitement par rapport aux témoins. Cependant, aucune modification de la réactivité de leurs surrénales n'a été mise en évidence lors de l'épreuve à l'ACTH (chapitre 3 partie 2). Il faut toutefois remarquer que, bien que ce test ait été utilisé chez les bovins pour mettre en évidence un stress chronique, il n'a pas toujours été concluant (revue de Mormède *et al.* 2007).

Au niveau comportemental, des réponses différentes sont encore observées la 8^{ème} semaine chez les vaches soumises à une tension électrique comparées aux vaches témoins : elles sont plus rapides à aller boire une fois entrées dans la stalle d'abreuvement et un nombre moins important de visites avec lapement est observé par rapport aux vaches témoins (chapitre 3 partie 3). Ces résultats vont dans le même sens que les observations décrites dans les élevages touchés par les tensions électriques parasites qui font état de lieux évités ou peu fréquentés par les animaux (revue de Brugère 2002). Les animaux ont des besoins physiologiques en eau à couvrir pour assurer leur entretien et leur production laitière. Dès que ces besoins sont

couverts, ces animaux ressortent rapidement de la stalle d'abreuvement. Le fait d'être plus rapide à aller boire une fois entré dans la stalle d'abreuvement pourrait traduire une stratégie d'évitement ou de fuite (Arnold *et al.* 2007).

Chez les ovins, certains critères de la physiologie du stress pourraient indiquer la présence d'un stress chronique modéré après 6 semaines d'exposition permanente à une tension électrique de 3,5 V. Cependant, ces résultats restent à confirmer avec les mesures comportementales et physiologiques réalisées chez les agnelles. Chez les vaches, l'exposition à une tension électrique en permanence ne semble pas entraîner de stress chronique.

2.4. Conséquences des tensions électriques sur les performances zootechniques

Nous nous sommes placés en situation proche de celles rencontrées en élevage, en mesurant des critères d'intérêt zootechniques, chez les vaches comme chez les agneaux.

2.4.1. Production laitière

Aucune modification durable de la production laitière n'a été mise en évidence (chapitre 3 partie 2). Seule une diminution transitoire de 4 % (-1,4 kg) de la production laitière a été observée le deuxième jour d'exposition chez les vaches soumises en permanence à la tension électrique, et de 10 % (-3.5 kg) la troisième journée chez les vaches soumises à la tension électrique de manière aléatoire.

Cette chute de production ponctuelle est en accord avec celle observée par Reinemann *et al.* (2005) chez des vaches soumises à un courant électrique de 1,5 fois la valeur seuil de réaction de l'individu (soit de 9 à 17 mA, valeur au pic) ou de la valeur seuil plus 3 mA (soit de 11 à 20 mA, valeur au pic), c'est-à-dire pour des courants d'une intensité trois fois supérieure à celle que nous avons appliquée. Cependant, la quantité de lait hebdomadaire produite n'a pas été modifiée durant les 8 semaines d'exposition à la tension. Ce résultat est en accord avec les travaux de Gorewit *et al.* (1992).

Aucun effet de l'exposition répétée à la tension électrique n'a été observé sur le TB et le TP du lait, ce qui est cohérent avec la littérature (Gorewit *et al.* 1985, Henke Drenkard *et al.* 1985, Aneshansley *et al.* 1992, Gorewit *et al.* 1992).

La question de l'influence des tensions électriques parasites sur le comptage cellulaire revêt un caractère qui peut être sujet à controverse dans la mesure où ce comptage intervient directement dans le paiement du lait, avec la mise en place de pénalités lorsque le lait contient plus de 300×10^3 cellules par mL. Aucun effet de la tension électrique n'a été observé sur ce critère au cours de cette thèse (chapitre 3 partie 2), en cohérence avec la littérature (Gorewit *et al.* 1985, Henke Drenkard *et al.* 1985, Gorewit *et al.* 1992, Southwick *et al.* 1992). Le comptage cellulaire dans le lait est un critère particulier qui ne semble répondre, et de manière modérée, qu'à des agents stressants forts tels qu'un stress thermique, des mauvaises conditions de logement, des mélanges d'animaux, de l'isolement ou la présence d'un chien

(revue de Wegner *et al.* 1976, revue de Dohoo et Meek 1982), ces effets n'étant pas observés dans toutes les expérimentations (Paape *et al.* 1973a, Paape *et al.* 1973b). De plus, ces effets sont plus importants si le niveau d'infection initial de la mamelle est élevé (revue de Harmon 1994, Coulon et Pérochon 2000).

Le niveau de production laitière est fortement corrélé aux mammites cliniques ($r=0,45$) même si la corrélation entre le niveau de production laitière et le score cellulaire moyen par lactation reste faible ($r = 0,15$) (Rupp et Boichard 2000). Le modèle expérimental de vaches laitières utilisé (Prim'Holstein fortes productrices) aurait pu s'avérer plus sensible, au niveau de la production et de la qualité du lait, aux tensions électriques que des animaux de niveau de production plus faible ou de race moins spécialisée. Cependant nos résultats ne nous permettent pas de conclure que des tensions électriques appliquées en permanence ou de manière aléatoire modifient le comptage cellulaire de vaches laitières fortes productrices.

2.4.2. Production de viande

L'exposition pendant 6 semaines à une tension électrique n'a pas modifié le GMQ et l'indice de consommation des agneaux (chapitre 2 partie 1). Les seules études chez des animaux en croissance-finition ont été réalisées chez le porc. Chez cette espèce, le GMQ et l'indice de consommation n'ont pas été influencés par la présence de tensions électriques (de 2 à 8 V) au niveau de la mangeoire et de l'abreuvoir (Robert *et al.* 1992, Godcharles *et al.* 1993). Cependant, bien que la conformation des carcasses d'agneaux n'ait pas été influencée par la tension électrique, l'état d'engraissement a été modifié. Ainsi, les carcasses classées R (bonne conformation dans la grille EUROP) des agneaux soumis à la tension électrique ont été moins grasses que celles des agneaux témoins. Ce résultat peut paraître à première vue surprenant dans la mesure où la tension électrique est considérée comme un agent stressant, et que le cortisol favoriserait le dépôt de gras au dépend du muscle (Devenport *et al.* 1989). Cependant, deux hypothèses pourraient expliquer cette contradiction. Premièrement, la répétition durant 6 semaines de l'exposition à l'agent stressant pourrait avoir diminué la réponse des agneaux à l'agent stressant et donc la sécrétion de cortisol. En effet, le stress chronique peut réduire la réactivité des glandes surrénales (revue de Mormède *et al.* 2007) : pour une même quantité d'ACTH, une plus petite quantité de cortisol est sécrétée. Cette hypothèse est par ailleurs corroborée par la tendance, au moment de l'abattage, à une concentration plasmatique en cortisol plus faible chez les agneaux soumis en permanence à la tension électrique par rapport aux agneaux témoins. Deuxièmement, la différence dans l'état d'engraissement pourrait être en partie expliquée par les effets du stress sur le métabolisme des agneaux durant la période d'engraissement, dans la mesure où le cortisol peut avoir une action lipolytique sur les adipocytes (Sapolsky *et al.* 2000). En outre, les besoins métaboliques au niveau tissulaire peuvent être plus importants suite à une exposition prolongée à un agent stressant, ce qui pourrait entraîner une réduction du dépôt de gras. Toutefois, le fait que la concentration basale

en cortisol n'ait pas été modifiée par les traitements, soit après 1 semaine d'exposition à la tension, soit après 6 semaines, ne corrobore pas ces hypothèses.

Les résultats des expérimentations conduites à moyen terme sur les bovins laitiers et les ovins sont en accord avec l'ensemble des expérimentations menées en milieu contrôlé dans lesquelles des courants électriques proches de ceux que nous avons appliqués n'ont pas eu d'effets sur la production laitière ou la croissance des animaux d'élevage (chapitre 1 partie 1). Le nombre d'expérimentations reste cependant limité dans la littérature, en particulier chez les ruminants en croissance.

2.5. Comparaison avec d'autres agents stressants rencontrés en élevage

Dans des conditions d'élevage intensives ou extensives, les animaux peuvent être soumis à divers agents stressants d'origine sociale ou environnementale. Les tableaux 5 et 6 récapitulent les réponses comportementales et physiologiques ainsi que les modifications des performances zootechniques suite aux principaux agents stressants rencontrés en élevage. Pour des raisons pratiques et de cohérence avec le modèle principal utilisé lors de cette thèse, le choix a été fait de ne présenter que les réponses des vaches laitières soumises à des agents stressants susceptibles d'être rencontrés dans les élevages laitiers.

Les agents stressants ont été classés en deux catégories en fonction de leur durée : ponctuelle ou prolongée. Des modifications à court terme du comportement ou de la physiologie sont observées pour de nombreux agents stressants. Cependant, seuls quelques agents stressants sont responsables, chez les bovins, de modifications durables des performances de production (stress thermique, changement hiérarchique, réallotement ou relation homme-animal négative). D'après nos résultats, les réponses des vaches soumises à un courant électrique de 3,6 mA pourraient indiquer qu'en élevage les courants électriques parasites sont des agents stressants modérés.

Tableau 5. Influence de différents agents stressants (facteurs environnementaux) sur les réponses comportementales, physiologiques et les paramètres de production chez les bovins.

Facteurs environnementaux	Durée d'exposition	Réponses comportementales	Réponses physiologiques	Paramètres de production	Références
<i>Stress thermique</i>	Durée variable	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Ingestion de matière sèche réduite ♦ Activité réduite ♦ Recherche de l'ombre et de courant d'air 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation de la température corporelle ♦ Augmentation de la fréquence respiratoire 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Diminution de la production laitière ♦ Performance de reproduction détériorée 	(West 2003) (Jordan 2003)
<i>Attache</i>	3 et 5 semaines	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Modification du comportement de repos (nombre de périodes couchées réduit et exploration de la litière plus importante) 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Modification de la fréquence de sécrétion du cortisol (1^{ère} semaine) ♦ Réactivité de l'axe corticotrope réduite (4^{ème} semaine) 		(Ladewig et Smidt 1989) (Jensen 1999)
<i>Permutation de côté à la traite (dans une salle de traite en tandem)</i>	18 traites consécutives	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Temps plus important pour rentrer sur le quai de traite ♦ Plus de pauses dans l'ingestion de concentré lors de la traite 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation de la fréquence cardiaque pendant la 1^{ère} minute de traite 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Pas de modification de la production laitière 	(Hopster <i>et al.</i> 1998)
<i>Transport</i>	4 à 9 heures		<ul style="list-style-type: none"> ♦ Forte élévation de la concentration plasmatique en cortisol 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation du taux de cellules somatiques dans le lait 	(Buckham Sporer <i>et al.</i> 2007) (Yagi <i>et al.</i> 2004)
<i>Boiterie</i>	5 mois	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Comportement d'œstrus moins marqué ♦ Modification du rythme d'activité ♦ Augmentation du temps passé couché 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Pas de modification de la concentration plasmatique en cortisol et en catécholamines 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Diminution de la note d'état corporel ♦ Diminution de la quantité de lait produite et du TP 	(Walker <i>et al.</i> 2008) (Juarez <i>et al.</i> 2003) (Ley <i>et al.</i> 1996) (Hemsworth <i>et al.</i> 1995)
<i>Pratiques vétérinaires</i>	Ponctuelle		<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elévation de la concentration plasmatique en cortisol puis retour au niveau basal après 80 minutes 		(Alam et Dobson 1986)

Tableau 6. Influence de différents agents stressants (facteurs sociaux) sur les réponses comportementales, physiologiques et les paramètres de production chez les bovins.

Facteurs sociaux	Durée d'exposition	Réponses comportementales	Réponses physiologiques	Paramètres de production	Références
<i>Séparation vache-veau</i>	Ponctuelle	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation des vocalisations ♦ Exploration de l'environnement plus importante 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elévation transitoire de la fréquence cardiaque ♦ Pas d'élévation de la concentration plasmatique en cortisol 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Pas de modification de la production laitière en cas de séparation tardive 	(Hopster <i>et al.</i> 1995) (Weary et Chua 2000) (Stehulová <i>et al.</i> 2008)
<i>Contacts négatifs avec l'homme (acoustiques, tactiles...)</i>	5 minutes à plusieurs mois	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Comportement des bovins en salle de traite fortement corrélé au comportement du trayeur 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Diminution de la fréquence cardiaque si contact positif avec les animaux lors de pratiques vétérinaires 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Influence négative de la peur de l'humain sur la production laitière 	(Breuer <i>et al.</i> 2000) (Waiblinger <i>et al.</i> 2002) (Waiblinger <i>et al.</i> 2004) (pour revue Waiblinger <i>et al.</i> 2006)
<i>Elévation dans la hiérarchie (basé sur la dominance ou la subordination)</i>	Durée non définie			<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation de la production laitière ♦ Diminution de l'intervalle vêlage-IA fécondante ♦ Diminution du taux de cellules dans le lait ♦ Réduction du score de boiterie 	(Dobson et Smith 2000)
<i>Réallotements successifs</i>	5 jours à 14 semaines	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation des agressions ♦ Comportement alimentaire perturbé (interruptions d'ingestion fréquentes, durée d'ingestion réduite) ♦ Augmentation de l'activité après réallotement 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Augmentation de la concentration plasmatique en cortisol suite à l'injection d'ACTH 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Diminution de la production laitière ♦ Pas d'effet sur la croissance des veaux, ni sur la carcasse des veaux 	(Hasegawa <i>et al.</i> 1997) (Bøe et Færevik 2003) (Veissier <i>et al.</i> 2001) (Boissy <i>et al.</i> 2001) (Raussi <i>et al.</i> 2005)

3. Habituation et adaptation des animaux

L'habituation est une forme d'apprentissage non-associatif (McFarland *et al.* 2001) qui aboutit à une diminution des réponses à un agent stressant. Elle dépend de la possibilité de contrôle de l'agent stressant mais aussi de son pouvoir aversif (Bouissou 1992). Pour Groves et Thompson (1970) les deux paramètres qui influencent le plus le processus d'habituation sont l'intensité du stimulus (dans notre cas l'intensité du courant) et la fréquence (dans notre cas le nombre d'expositions à ce courant).

Par adaptation, dans le cadre de cette thèse, nous entendons une modification du comportement en réponse à un agent stressant qui permet de limiter l'impact négatif de cet agent stressant (revue de Wechsler et Lea 2007).

L'adaptation et l'habituation sont deux processus qui peuvent intervenir de manière simultanée ou non.

3.1. Effet de la familiarité, de l'expérience passée et de l'intensité de l'agent stressant sur le processus d'habituation

Suite à l'exposition à des tensions électriques dont la valeur augmentait quotidiennement, les génisses ont présenté des réponses de stress aigu (augmentation de la concentration plasmatique en cortisol) pour une tension de 1 V, mais cette réponse physiologique n'a plus été observée pour des tensions plus élevées (3 V et 5 V) (chapitre 3 partie 1). Les vaches laitières soumises à une tension électrique de manière permanente ou aléatoire au niveau de leur abreuvoir ont manifesté initialement des réponses de stress aigu. Dès la deuxième semaine, la majorité des réponses comportementales et physiologiques de stress n'a plus différé entre les vaches soumises à une tension électrique en permanence et les vaches témoins, ce qui pourrait être le signe d'une habituation (chapitre 3 partie 3).

Par contre, les vaches soumises à une tension électrique aléatoire ne semblent pas s'habituer à l'agent stressant. En effet, des réponses de stress ont été observées en huitième semaine (résultat discuté dans la partie imprévisibilité). Il est probable que la familiarité de l'agent stressant puisse moduler l'habituation des animaux à cet agent stressant. En effet, la familiarité d'un objet (Désiré *et al.* 2004) ou la familiarité des congénères (Takeda *et al.* 2003) permettent d'atténuer les réponses de stress des animaux d'élevage. La réponse de stress à 1 V des génisses soumises quotidiennement à des tensions électriques de plus en plus élevées pourrait être liée à la nouveauté provoquée par la tension en plus du désagrément alors qu'à 3 V et 5 V (c'est-à-dire après 9 et 15 confrontations à l'agent stressant), cette composante « nouveauté » de l'agent stressant aurait disparu, même si le niveau de tension est plus élevé. De plus, en changeant plus rapidement de mangeoire à 3 et 5 V, les génisses ont présenté des comportements d'adaptation leur permettant d'avoir un meilleur contrôle de la situation. Or, la contrôlabilité permet de réduire les réponses de peur (Puppe *et al.* 2007).

L'expérience passée module également la réponse des génisses à la tension électrique. En effet, des génisses naïves vis-à-vis de l'électricité ont manifesté une réponse de stress (concentration plasmatique en cortisol plus importante) lors de la première application de la tension contrairement aux génisses ayant eu une expérience de l'électricité (chapitre 3 partie 1).

Chez les bovins (génisses et vaches laitières, chapitre 3 parties 1, 2 et 3), l'habituation a probablement pu avoir lieu parce que l'agent stressant était d'une intensité modérée : 1,8 V soit 3,6 mA pour l'abreuvoir et 3,3 V soit 2,9 mA pour la mangeoire. En effet, les bovins peuvent s'habituer à des agents stressants modérés. Ainsi, chez des génisses, la fréquence cardiaque augmente lors de la première exposition au bruit (85 dB) puis n'augmente plus dès la deuxième exposition, ce qui montre une habituation des animaux (Waynert *et al.* 1999, Arnold *et al.* 2007). Par ailleurs, il a également été montré chez des vaches que des manipulations répétées entraînaient une diminution de la concentration plasmatique en cortisol au cours des manipulations successives, ce que les auteurs ont interprété comme une habituation (Andrade *et al.* 2001). De plus, dans notre expérimentation, la fréquence d'exposition à l'agent stressant était probablement suffisamment régulière pour que les vaches s'habituent à l'agent stressant (chapitre 3 parties 2 et 3). En effet, l'intensité du stimulus (ou son côté aversif pour un agent stressant) et la fréquence d'exposition à ce stimulus sont les deux facteurs principaux intervenant dans l'apparition du phénomène d'habituation (Groves et Thompson 1970).

3.2. Adaptation du comportement en présence de l'agent stressant

Les animaux soumis à une tension électrique ont modifié leur comportement, probablement de manière à diminuer l'impact négatif de la tension. Cette modification du comportement n'est pas la même à court terme et à moyen terme.

A court terme, certains comportements comme l'augmentation du nombre de visites avec un mouvement brusque, du nombre de visites quotidiennes et de l'activité générale des vaches sont la conséquence de la présence de l'agent stressant. D'autres comportements sont probablement mis en place pour éviter l'agent stressant (visites plus fréquentes dans une stalle où l'abreuvoir n'est pas accessible et diminution du nombre de visites avec lapement), même si ces stratégies ne se sont pas toujours efficaces, comme la visite des stalles des autres traitements (pas d'accès possible à l'abreuvoir) (chapitre 3 partie 3). Pour les génisses soumises quotidiennement à des tensions électriques croissantes (de 0 à 5 V par palier de 0,3 V), une latence plus rapide pour aller ingérer du concentré dans la mangeoire non électrifiée a été observée, ce qui leur a permis de passer moins de temps à ingérer dans la mangeoire électrifiée (chapitre 3 partie 1). A court terme, les animaux ont donc diminué le temps de contact avec l'élément mis sous tension (chapitre 3 parties 1 et 3).

A moyen terme, des comportements différents ont été observés en présence de la tension : augmentation du temps passé à boire (uniquement chez les vaches soumises à la tension de manière aléatoire), diminution du nombre de visites avec lapement et diminution de la latence pour aller boire après l'entrée dans la stalle. La diminution du nombre de visites avec lapement des vaches soumises de manière permanente ou aléatoire à la tension électrique pourrait permettre de diminuer l'intensité du courant parcourant le corps. En effet, la langue est un organe humide, musculeux, richement vascularisé et innervé (Bressou 1978). Ces caractéristiques font de la langue un chemin privilégié pour le courant électrique car offrant une faible résistance (Gabriel *et al.* 1996b). En lapant, les vaches exposent leur langue à l'abreuvoir électrifié, ce qui réduit la résistance de contact et par conséquent augmente l'intensité du courant parcourant leur corps. La réduction du lapement pourrait donc être une adaptation comportementale afin de réduire l'intensité du courant.

En huitième semaine, l'augmentation du temps passé à boire en présence de la tension chez les vaches soumises à une tension électrique aléatoire, par rapport au temps passé à boire en absence d'électricité, semble à première vue surprenante. Cependant, une étude approfondie des intensités du courant mesurées au niveau de l'abreuvoir a montré que l'intensité du courant lors de la buvée était la plus importante lors des premières secondes de contact avec l'eau et diminuait progressivement au cours de la buvée, probablement en raison d'une augmentation de la résistance de contact (mufle-abreuvoir) à mesure que le niveau d'eau descend dans l'abreuvoir (figure 4). En augmentant le temps passé à boire, les animaux diminuent donc la valeur du courant les traversant au cours de la buvée. Comme vraisemblablement le désagrément maximal a lieu au début de la buvée, les animaux ont intérêt à privilégier un rallongement du temps de buvée en présence de l'électricité et donc à boire le maximum d'eau par buvée plutôt que de multiplier le nombre de buvées et donc le nombre de contacts avec un courant de plus forte intensité.

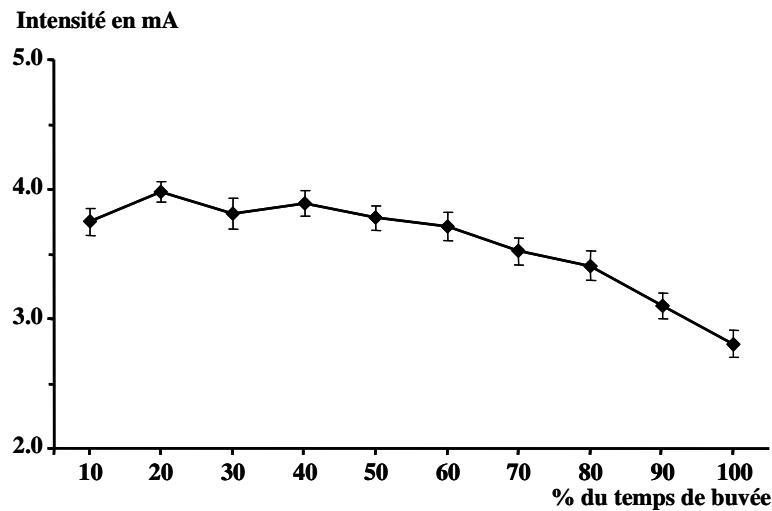


Figure 4. Evolution moyenne au cours de la buvée du courant traversant le corps des vaches soumises à une tension électrique de 1,8 V au niveau de leur abreuvoir. Dix mesures électriques réparties régulièrement sur la durée de la buvée ont été effectuées au cours des épisodes de buvée (n = 28 vaches, soit 79 buvées, moyenne \pm erreur standard).

3.3. Interaction entre adaptation et habituation

Dans une situation donnée, un individu peut adapter son comportement pour limiter l'impact négatif de l'agent stressant sans toutefois s'y habituer : il continuera à présenter des réponses de stress lors des confrontations à l'agent stressant. Les vaches exposées de manière imprévisible à l'agent stressant ne se sont pas habituées alors qu'une adaptation comportementale a été observée. Cette absence d'habituation peut-être expliquée par la fréquence d'exposition irrégulière qui ne permet pas l'habituation en dépit de la stratégie d'adaptation mise en place. Il est également possible d'envisager qu'un individu adapte son comportement et s'habitue également à l'agent stressant, c'est-à-dire qu'il ne présente plus de réponses de stress après un certain nombre de confrontations à l'agent stressant. Les vaches exposées en permanence, après 6 ou 8 semaines d'exposition, semblent s'être habituées aux tensions grâce à une fréquence d'exposition élevée et régulière, et une intensité du stimulus moyenne (figure 5). Dans le même temps, ces vaches ont également adapté leur comportement en lapant moins.

A court terme, les résultats obtenus chez les génisses montrent également que la relation entre l'habituation et l'adaptation peut aboutir à des comportements différents suivant l'expérience antérieure et la fréquence d'exposition à la tension électrique (chapitre 3 partie 1). En effet, les génisses n'ayant jamais été confrontées à une tension électrique (naïves) ont mis en place une stratégie d'adaptation en changeant rapidement de mangeoire lorsqu'elles étaient exposées à la tension électrique de manière prévisible. Au contraire, les génisses n'ayant jamais été confrontées à une tension électrique (naïves) mais exposées à la tension électrique de manière imprévisible n'ont pas réussi à mettre en place une stratégie d'adaptation en

apprenant à éviter la mangeoire électrifiée au bout de 11 jours (soit 4 expositions). Les génisses expérimentées, c'est-à-dire ayant déjà été confrontées aux tensions électriques (jusqu'à 5 V) à plusieurs reprises (19 expositions), ont eu un comportement intermédiaire entre les génisses naïves exposées à la tension électrique de manière imprévisible et prévisible. Ces animaux expérimentés, étant déjà « habitués » aux tensions électriques, ont été probablement moins perturbés que les animaux naïfs et ont fait moins d'efforts pour adapter leur comportement en ne changeant pas rapidement de mangeoire.

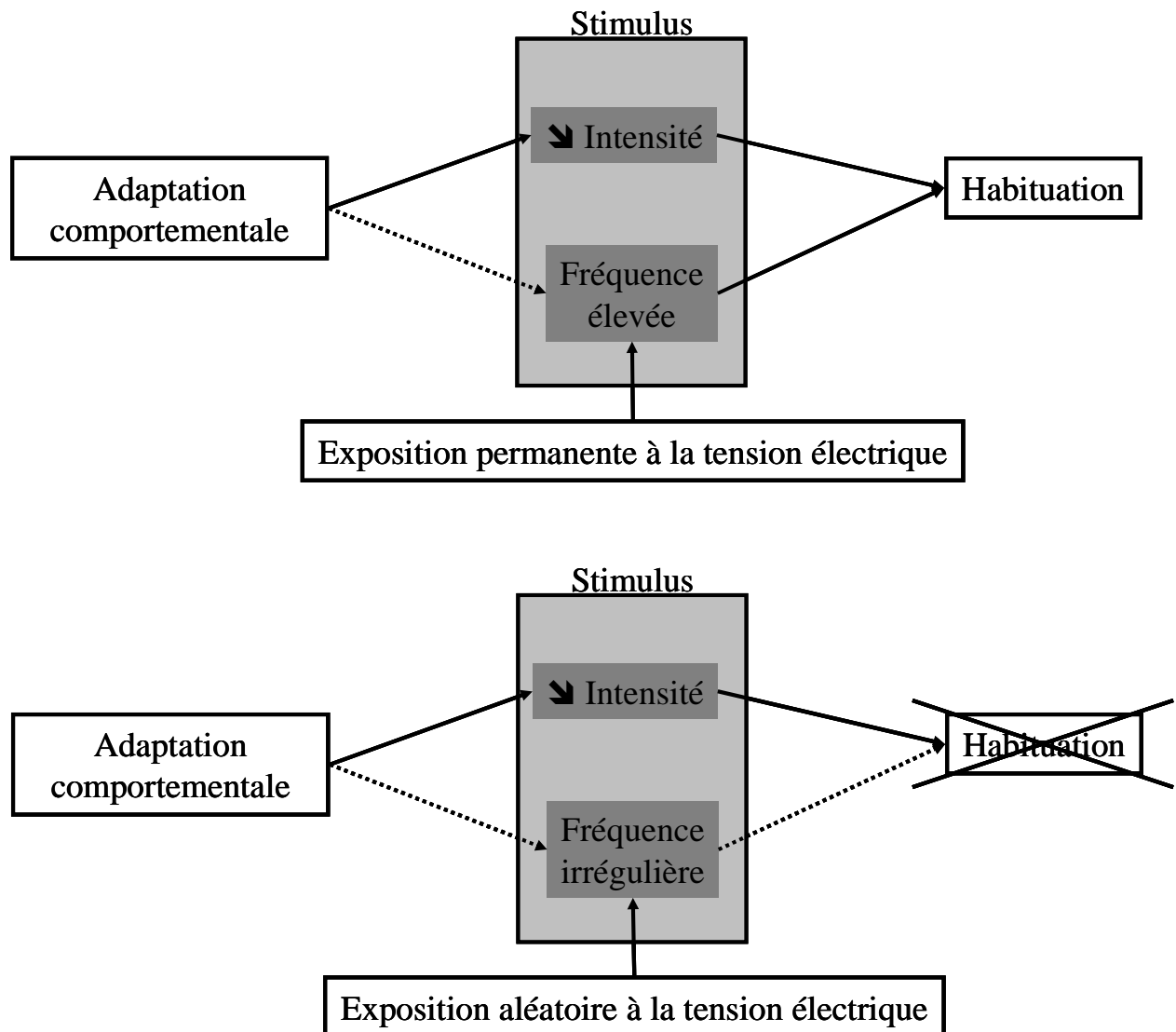


Figure 5. Adaptation comportementale et habituation à moyen terme de vaches laitières soumises pendant 8 semaines à une tension électrique (1,8 V soit 3,6 mA) au niveau de leur abreuvoir, soit de manière permanente (prévisible), soit de manière aléatoire (imprévisible, 36 heures/semaine). En cas d'exposition permanente, l'intensité du stimulus est réduite par l'adaptation comportementale mais la fréquence du stimulus reste élevée - les animaux peuvent s'habituer. En cas d'exposition aléatoire, l'intensité du stimulus est réduite par l'adaptation comportementale mais la fréquence du stimulus reste faible et irrégulière - les animaux ne s'habituent pas.

4. Imprévisibilité des tensions parasites et conséquences sur les animaux

4.1. Justification du choix de l'étude de l'imprévisibilité

L'étude du rôle de l'imprévisibilité répondait à deux constats : tout d'abord l'imprévisibilité des tensions électriques parasites est une réalité en situation d'élevage (Deschamps 2002). Ensuite, cet aspect n'a été que très peu pris en considération dans la littérature. Une des hypothèses de cette thèse était que l'exposition à une tension électrique de manière aléatoire générerait une réponse de stress aigu, puis chronique à moyen terme. L'exposition à une tension électrique de manière aléatoire rendrait plus difficile l'adaptation et probablement l'habituation des animaux par rapport à des animaux soumis à une tension électrique appliquée en permanence.

Comme cela a été présenté dans le chapitre 1, la prévisibilité d'un événement repose sur des indices temporels ou des signaux fiables indiquant l'occurrence de l'évènement (Bassett et Buchanan-Smith 2007). En élevage, l'imprévisibilité des tensions électriques parasites a une double dimension. Elle a d'abord une dimension temporelle : les tensions électriques parasites peuvent être présentes à n'importe quel moment de la journée. Ensuite, la seconde dimension est spatiale : les tensions électriques parasites ne sont pas systématiquement associées à un endroit précis de l'élevage (revue de Hultgren 1990, revue de Brugère 1993). Seule la dimension temporelle de l'imprévisibilité a été étudiée afin d'éviter dans un premier temps de complexifier les dispositifs expérimentaux : l'imprévisibilité a consisté en une mise sous tension des abreuvoirs pendant des périodes de durées variables (de 4 à 16 heures), ces périodes étant espacées aléatoirement dans le temps. Une multiplicité de lieux où la tension électrique serait présente couplée à une imprévisibilité temporelle pourrait s'avérer plus perturbant pour les animaux d'élevage par rapport aux conditions utilisées durant cette thèse.

4.2. Effets de l'imprévisibilité à court et moyen terme

A moyen terme, peu de différences sur la physiologie du stress ont été obtenues pour les agneaux soumis à une tension électrique de 3,5 V de manière prévisible ou imprévisible (chapitre 2 partie 1). L'analyse ultérieure des données comportementales et physiologiques des agnelles (annexe 2) permettra de confirmer ou nuancer les résultats obtenus chez les agneaux mâles. Chez les bovins, les résultats sont contrastés. Dans le cadre des épreuves à court terme (chapitre 3 partie 1), l'imprévisibilité de l'exposition à la tension électrique a eu un impact négatif sur les génisses. Chez les vaches laitières soumises à une tension électrique imprévisible, des modifications physiologiques de stress sont encore observées la 8^{ème} semaine d'exposition (chapitre 3 parties 2 et 3).

Le facteur « imprévisibilité » du choc électrique est probablement plus négatif que la quantité totale d'électricité reçue puisque les vaches laitières soumises à une tension en permanence ont présenté moins de signes de stress dès la deuxième semaine (soit environ 50 visites à

l'abreuvoir / vache) alors que les vaches soumises à une tension électrique aléatoire en présentaient encore après 8 semaines (soit environ 75 visites c'est-à-dire 350 visites / vache / 8 semaines avec une exposition des vaches 36h/semaine soit environ 22% du temps). Chez les ovins, la conclusion est différente, puisque la quantité d'électricité « reçue » semble avoir eu des conséquences plus importantes en termes de réponses de stress que le facteur imprévisibilité. Même s'il ne faut pas écarter la possibilité d'un apprentissage social qui aurait diminué cet effet « imprévisibilité ». Une expérimentation réalisée chez les porcs par Hemsworth *et al.* (1987) montre qu'un agent stressant important (contact négatif avec l'homme), peu fréquent mais imprévisible, peut être au moins aussi négatif à moyen terme sur la physiologie du stress et les performances zootechniques que ce même agent stressant appliqué de manière régulière. En effet, une augmentation de la concentration plasmatique en cortisol, une augmentation de l'indice de consommation et une réduction de la croissance ont été observées chez les porcs après 6 semaines d'exposition à des contacts répétés avec l'homme dont la valence était imprévisible (c'est-à-dire des contacts 1 fois sur 6 négatifs et 5 fois sur 6 positifs) et chez des porcs soumis à chaque fois à des contacts négatifs par rapport aux porcs soumis à des contacts positifs ou neutres. De plus, la réactivité émotionnelle de ces porcs a été modifiée lors d'un test de réactivité à l'homme : une latence plus grande pour interagir avec l'homme et un nombre d'interactions plus faible ont été observés pour les porcs recevant des contacts négatifs imprévisibles ou négatifs régulièrement par rapport aux porcs soumis à des contacts positifs ou neutres. Les auteurs ont conclu que l'imprévisibilité du traitement engendrait un stress chronique et avait des conséquences négatives sur la croissance des porcs. Au cours de notre expérimentation, nous obtenons des résultats similaires au niveau de la physiologie du stress et de la réactivité émotionnelle pour les vaches soumises à une tension électrique imprévisible sans toutefois observer de diminution des performances de production. Cette dernière observation peut être expliquée par le fait que l'agent stressant utilisé par Hemsworth *et al.* (1987) était probablement un agent stressant plus fort que la tension électrique utilisée dans notre expérimentation (1,8 V soit 3,6 mA) qui semble être assimilé à un agent stressant modéré.

Les résultats obtenus chez la vache nous permettent de dresser le profil théorique moyen de réponses de stress à moyen terme à une tension électrique prévisible ou imprévisible (figure 6). Chez la vache, la prévisibilité permet l'habituation alors que l'imprévisibilité semble générer un stress chronique. Cette généralisation est toutefois à nuancer au regard des résultats des ovins.

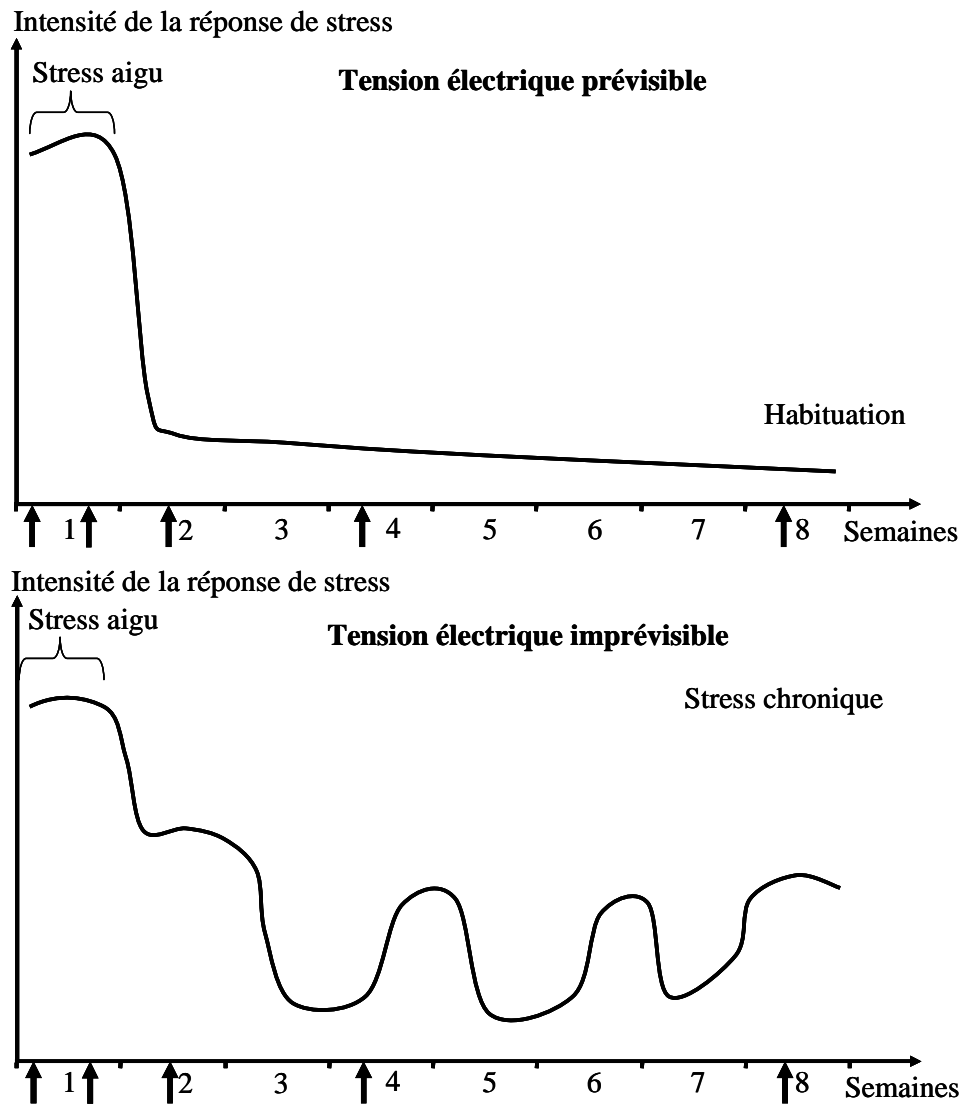


Figure 6. Profil théorique des réponses de stress chez des vaches exposées à une tension électrique prévisible ou imprévisible au niveau de l'abreuvoir. Les flèches représentent les temps auxquels des mesures ont été réalisées.

4.3. Contournement de l'imprévisibilité

Il est possible qu'au cours de nos expérimentations à moyen terme (chapitre 2 partie 1 et chapitre 3 parties 2 et 3), certains animaux aient appris à contourner le caractère imprévisible de l'agent stressant, bien que ce contournement soit difficile à mettre en évidence.

Contrairement à notre hypothèse de travail, l'exposition à une tension électrique imprévisible n'a pas eu d'effets prononcés chez les agneaux. Nous pouvons *a priori* exclure l'existence d'une « prévisibilité temporelle » pour les traitements dits « aléatoires » dans la mesure où les plages d'exposition étaient de durées variables (de 4 à 16 heures d'exposition) et espacées de manière aléatoire au cours de la semaine. De plus, les travaux de Greiveldinger *et al.* (2007) montrent que chez les ovins la « prévisibilité temporelle » n'est pas aussi efficace que la « prévisibilité associative » pour prévenir l'individu de l'occurrence d'un évènement

surprenant. Par contre, en dépit de son caractère aléatoire, il peut être envisagé que certains agneaux ou certaines vaches aient appris à identifier les moments où la tension était appliquée. Les animaux d'élevage sont en effet capables d'obtenir des informations de leur environnement et de leurs congénères, par exemple à partir des phéromones urinaires (Vieuille-Thomas et Signoret 1992, Boissy *et al.* 1998) ou de réponses comportementales (Morgan *et al.* 2001), afin d'adapter leur comportement à la situation. L'apprentissage social est un facteur important chez les animaux d'élevage, qui permet une meilleure adaptation à leur environnement (revue de Wechsler et Lea 2007). Ainsi, des porcelets inexpérimentés ont été capables d'apprendre à ingérer de l'aliment solide simplement par l'observation d'un individu déjà habitué à ingérer cet aliment (Morgan *et al.* 2001).

La possibilité pour un animal de transmettre une information relative au caractère désagréable d'une expérience revêt un intérêt fonctionnel important. Cela permettrait d'informer les congénères des risques provenant de l'environnement et par conséquent d'éviter un éventuel danger. Darwin (1872) a observé que les expressions faciales de protection des animaux jouaient un rôle de communication. Les réflexes de protection, qui incluent le rétrécissement des yeux, l'aplatissement des oreilles ou le hérissément des poils autour du cou, servent à protéger les organes sensoriels au moment du danger. Ces réponses sont des informations potentielles pour les autres animaux qui peuvent les interpréter comme des signes de peur ou de colère. Les expressions faciales semblent donc de bons candidats pour la sélection d'un système de communication efficace. Chez les animaux de rente, des travaux récents ont montré que certaines expressions faciales étaient des indicateurs de l'état émotionnel de l'individu. Par exemple, chez la vache, la proportion de blanc visible dans l'œil est utilisée pour décrire l'état émotionnel de l'individu sur un axe frustration-contentement (Sandem *et al.* 2002, Sandem *et al.* 2006a). Cette proportion augmente au cours de différentes situations telles que l'attente de la distribution d'un aliment appétant (Sandem *et al.* 2006b), l'exposition à un nouveau stimulus (Sandem *et al.* 2004) ou bien encore la séparation entre la mère et sa progéniture (Sandem et Braastad 2005). La position des oreilles semble également être un bon candidat pour traduire l'état émotionnel des animaux de rente (Reefmann *et al.* 2009), avec une proportion plus importante de postures d'oreilles passives (oreilles pendant librement sans mouvements de la tête) chez des ovins recevant un aliment appétent. La durée de la posture « oreilles asymétriques » varie aussi en fonction de l'évaluation cognitive des stimuli environnementaux (Désiré 2004). Chez les bovins, une fréquence élevée de postures oreilles pendantes a été utilisée comme indicateur de l'évaluation positive des animaux de leurs sites favoris de toilettage (Schmied *et al.* 2008). Une modification de la position des oreilles de l'individu en train de boire et confronté à une tension électrique, ainsi que d'autres modifications comportementales comme des mouvements brusques de la tête, pourraient être utilisés comme un indicateur pour les autres congénères et les inciter à éviter l'abreuvoir. Cette prise d'information a peut-être été facilitée par le dispositif de stalle d'abreuvement utilisé chez les agneaux (annexe 4). En effet, les animaux d'un même traitement étaient logés

dans un même enclos et la stalle ne cachait pas entièrement l'agneau, notamment sa tête et son postérieur. Les vaches soumises à une tension électrique aléatoire n'ont par contre pas pu utiliser ces informations car le dispositif expérimental isolait l'individu en train de boire avec seulement les mouvements de queue visibles. De plus, tous les animaux (des trois traitements) étaient logés dans le même enclos ce qui rend l'hypothèse d'un apprentissage social moins crédible, les vaches devant traiter en priorité les informations des animaux provenant de leur traitement c'est-à-dire buvant dans la même stalle.

5. Une variabilité individuelle de réponse

5.1. Résistance corporelle

Un paramètre clef expliquant une part importante des différences observées dans les réponses des animaux aux tensions électriques est la résistance corporelle. Une forte variabilité de la résistance électrique a été enregistrée chez les bovins. Cette variabilité est d'autant plus importante dans un milieu où la résistance de contact est élevée. Ainsi, lorsqu'une tension de 2,3 V est appliquée sur la mangeoire des génisses (seuil de réponse des génisses, chapitre 3 partie 1), la résistance du complexe mangeoire-génisse-plaque métallique varie de 517 à 2377 ohms avec une moyenne de 1086 ohms et un écart type de 421,5 ohms (figure 7). Chez les vaches laitières, lorsqu'une tension de 1,8 V est appliquée au niveau de l'abreuvoir (chapitre 3 partie 2), la variabilité observée entre les individus est plus réduite : de 371 à 988 ohms avec une moyenne de 537 ohms et un écart type de 134,3 ohms (figure 7).

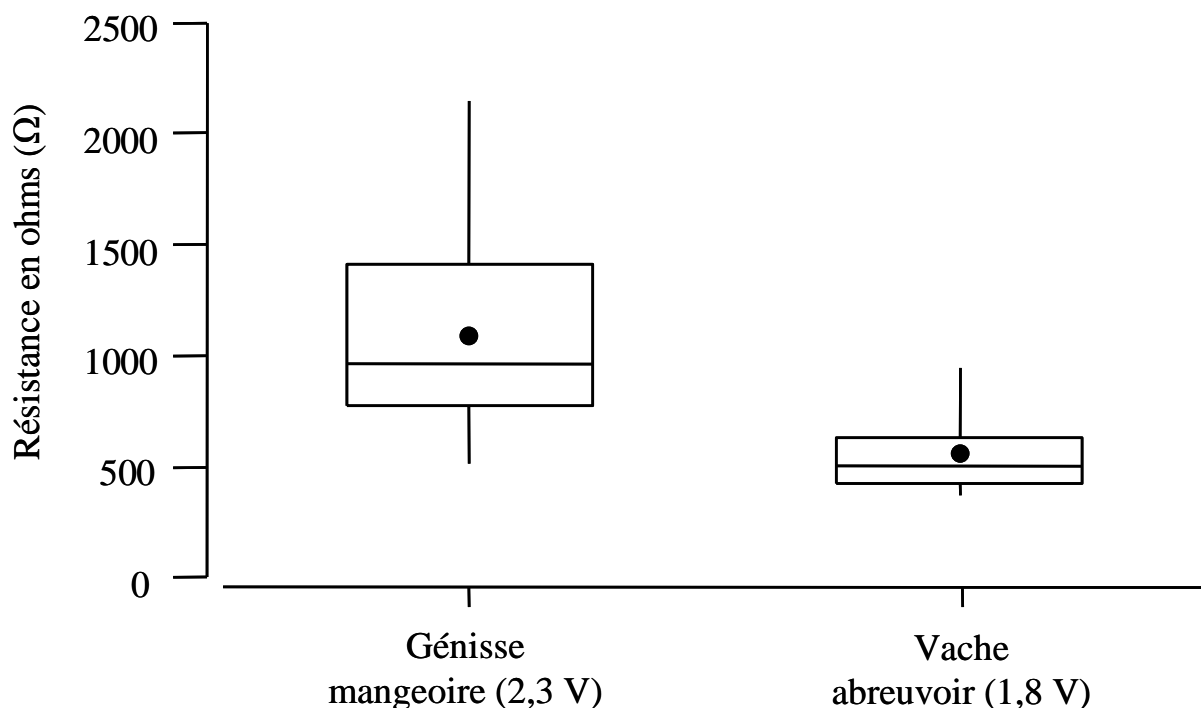


Figure 7. Variabilité de la résistance du complexe mangeoire-génisse-plaque métallique lors de l'application de 2,3 V et du complexe abreuvoir-vache-plaque métallique lors de l'application de 1,8 V. L'étendue interquartile (\square), la médiane ($—$), la moyenne (\bullet) et l'intervalle de confiance ($|$) sont représentés.

Ainsi, pour une même tension électrique, en fonction de la résistance du point de contact, l'intensité du courant traversant l'animal peut être multipliée par un facteur de 4,6 lorsque la tension est appliquée au niveau d'une mangeoire et par un facteur 2,7 lorsque la tension est appliquée au niveau d'un abreuvoir.

La résistance *stricto sensu* du corps des animaux d'élevages varie en fonction de l'espèce, de l'âge de l'animal, de son poids et de sa composition corporelle (chapitre 1). Cependant un point clef de la variation de l'intensité du courant traversant le corps de l'animal est la résistance des points de contacts (entrée et sortie).

Reinemann (2008) indique ainsi que la résistance du point de contact peut varier considérablement. Elle augmente en cas de diminution de la surface de contact, de diminution de la pression exercée sur la surface électrifiée et en présence d'une surface électrifiée plus sèche. Elle varie suivant l'état de propreté des onglons ou du museau et en fonction de la valeur de la résistance des matériaux au niveau du contact (paille sèche vs. fumier).

Alors que la résistance corporelle d'un individu reste stable et est caractéristique de l'individu (à un moment donné), la résistance des points de contact peut varier de manière importante en fonction du comportement de l'individu. Ainsi, des vaches (Reinemann *et al.* 2005) et des porcs (Valiquette *et al.* 1994) en exerçant une pression sur leur abreuvoir électrifié, ont pu augmenter la résistance du point de contact. Il est probable que, suivant le chemin emprunté par le courant électrique, les stratégies comportementales mises en place afin de limiter l'intensité du courant parcourant leur corps varient. Par exemple, dans le cas d'un courant électrique parcourant le chemin onglons antérieurs - onglons postérieurs, le comportement mis en œuvre aurait pu consister en un déplacement de la masse de l'individu sur l'un des onglons (décrite comme une « danse » d'une patte sur l'autre (Brugère 2002)) ou en un lever intempestif de l'un des membres. Dans notre expérimentation sur les vaches laitières (chapitre 3 partie 3), l'adaptation comportementale des vaches a consisté à prolonger la buvée ce qui a probablement augmenté la résistance du complexe abreuvoir-vache-plaque métallique.

Il est fort probable qu'en élevage, la variabilité de la résistance du point de contact soit responsable de la difficulté à diagnostiquer la présence de tensions électriques parasites. Dans la littérature, il est souvent précisé que la résistance corporelle des vaches est en général de 1 000 ohms, et de 500 ohms dans des situations extrêmes (milieu humide, trajet à travers l'animal offrant la plus faible résistance, faibles résistances de contact....) (Aneshansley et Gorewit 1991, revue de Brugère 2002). Cependant, réduire la résistance électrique des bovins à ces deux valeurs est préjudiciable à la compréhension de la variabilité observée des réponses individuelles à la tension électrique.

5.2. Réponse individuelle

Nous avons pu observer au cours de l'expérimentation à court terme sur les génisses une importante variabilité individuelle de réponse à la tension (chapitre 3 partie 1). Ainsi, certains individus n'ont manifesté aucun comportement d'évitement quelle que soit la tension (cas de la génisse 0022, figure 8) alors que d'autres individus ont montré des réponses comportementales permettant d'identifier clairement un seuil de réaction transitoire et un seuil de réaction persistante à la tension (cas de la génisse 0044, figure 8).

Cette variabilité individuelle a aussi été rapportée dans la littérature, même si ces observations restent relativement anecdotiques. Ainsi, dans l'expérimentation de Gorewit *et al.* (1989), six vaches ont refusé de boire pendant 36 heures et ne se sont pas habituées à la tension électrique appliquée au niveau de l'abreuvoir. Certes, le niveau de tension électrique était élevé (4, 5 et 6 V, soit de 5,5 à 17,4 mA) ce qui l'apparenterait plutôt à un agent stressant fort, néanmoins la réponse de ces individus illustre parfaitement la variabilité de réponse des animaux et la difficulté à généraliser au comportement d'un lot d'animaux.

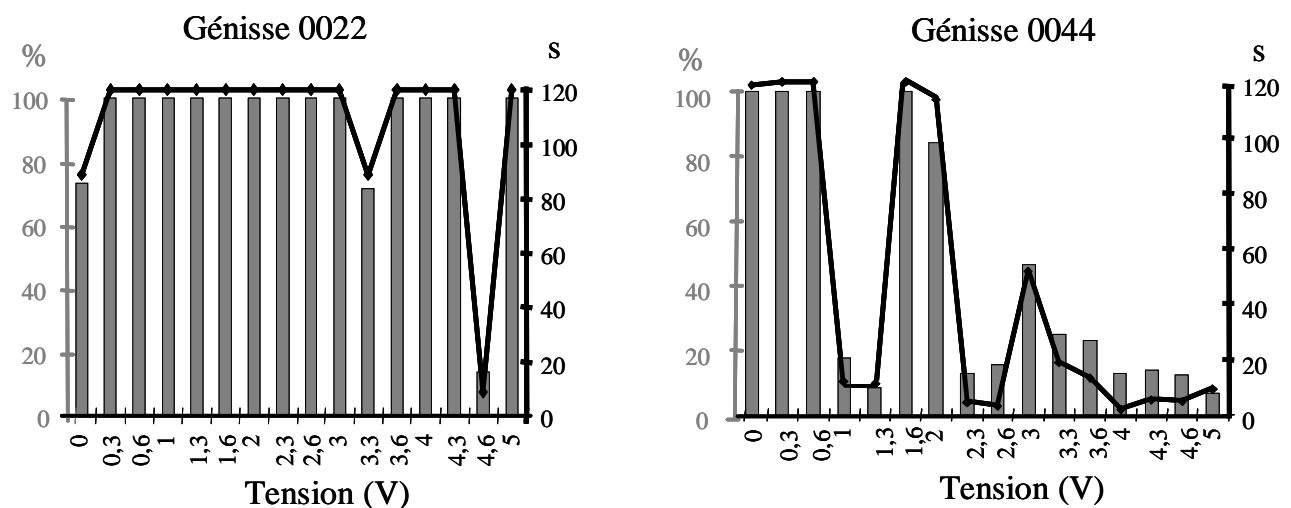


Figure 8. Variabilité inter individuelle de réponse de deux génisses soumises à une tension électrique au niveau de la mangeoire (de 0 à 5 V par palier quotidien de 0,33 V). Les variables observées sont le pourcentage d'aliment ingéré dans la mangeoire électrifiée (histogrammes) au cours des 2 minutes de test et la latence (courbe) pour ingérer du concentré dans la deuxième mangeoire (non électrifiée).

6. Le stress, un facilitateur ?

Même si la réponse de stress est souvent présentée comme néfaste pour l'individu, il est également admis, certes moins fréquemment, que le stress peut avoir un effet bénéfique sur l'organisme. En effet, il a été récemment montré que l'exposition à des agents stressants pouvait améliorer les capacités cognitives de l'individu (revue de Mendl 1999).

Dans cette thèse, nous avons fait l'hypothèse qu'une exposition en permanence ou aléatoire à des tensions électriques pouvait modifier la réactivité émotionnelle des animaux, notamment en augmentant les réponses de stress et en diminuant leurs performances. Or, les résultats semblent montrer qu'une confrontation répétée imprévisible à un agent stressant modéré (tension de 3,5 V) permettrait aux agnelles de mieux gérer une situation nouvelle de challenge (chapitre 2 partie 2). De même, dans un test de motivation à aller boire, les vaches soumises à la tension électrique de manière prévisible ont présenté plus d'exploration (latence du premier contact avec l'objet plus courte) et ont été moins perturbées lorsqu'un objet nouveau était présent à l'entrée de la stalle d'abreuvement (latence pour aller boire plus courte) que les vaches témoins (chapitre 3 partie 3). Par contre, ces effets n'ont pas été aussi marqués chez les vaches soumises à la tension électrique de manière imprévisible puisque ces animaux ont, au contraire, interagit moins avec l'objet que les vaches témoins. Des résultats similaires à ceux observés chez les ovins et les bovins ont été obtenus chez la poule. Lindqvist *et al.* (2009) ont montré que des poules (de souche sauvage) élevées dans un environnement imprévisible (durée de la période diurne aléatoire) ont été plus rapides à commencer à manger dans un test de motivation que des poules témoins. De plus, chez le porcelet, l'exposition précoce (< 2 semaines de vie) à une tâche spatiale (labyrinthe), qui probablement peut s'apparenter à un agent stressant modéré, a ultérieurement réduit la peur en présence d'un individu non-familier dans un test de réactivité à l'homme (Siegford *et al.* 2008).

Ainsi, un agent stressant répété modéré (et probablement faiblement aversif compte tenu des réponses des agneaux) ne semble pas avoir d'effets négatifs à moyen terme sur la réactivité émotionnelle avec, au contraire, des animaux qui semblent mieux s'adapter à des situations de stress modérés ultérieures.

Par contre, cette conclusion serait probablement à nuancer dans le cas d'une application d'un courant électrique plus élevé ou dans des situations d'élevage dans lesquelles les animaux seraient confrontés à un nombre important d'agents stressants.

7. Implications dans la conduite de l'élevage

Nos travaux sur les effets à moyen terme des tensions électriques ont été réalisés en milieu contrôlé, ce qui a permis, d'une part, de s'affranchir au maximum de facteurs de variation autres que les tensions électriques et, d'autre part, de disposer d'un lot témoin conduit dans les mêmes conditions expérimentales que les autres lots. Au niveau scientifique, l'inconvénient de conduire des observations en élevage, en comparant les performances avant et après la résolution des problèmes électriques, est de ne pas pouvoir dissocier l'effet du traitement de l'effet temporel (saison, disponibilités fourragères...) et donc de ne pas pouvoir apprécier réellement les conséquences des tensions électriques parasites. Nous avons pu aussi mettre en place des mesures comportementales et physiologiques qu'il est difficile de réaliser dans une exploitation agricole privée. Ainsi, les conditions expérimentales étaient contrôlées, c'est-à-dire que l'environnement était maîtrisé afin de ne faire varier qu'un seul facteur à la fois (la présence de la tension électrique). Les expérimentations ont toutefois été réalisées dans des conditions proches de celles du terrain, dans une exploitation que l'on peut qualifier d'intensive au vu de ses résultats technico-économiques. Cependant, dans le cas d'une exploitation agricole confrontée aux tensions électriques parasites, il n'est pas judicieux d'appliquer en l'état toutes les mesures mises en place au cours de cette thèse. En effet, en élevage la situation est multifactorielle et de nombreux facteurs peuvent influencer les réponses des animaux. La possibilité d'une confusion d'effets entre plusieurs facteurs reste donc très importante.

Les courants électriques parasites restent des phénomènes complexes, difficiles à mettre en évidence en élevage. Certains critères comportementaux, bien que non spécifiques, seraient néanmoins assez sensibles pour indiquer la présence éventuelle de courants électriques. Ainsi, si l'éleveur constate des réticences des animaux à se rendre dans certains endroits de l'élevage, si certains abreuvoirs sont délaissés par rapport à d'autres, ou si les animaux semblent particulièrement agités, et qu'en parallèle l'éleveur observe une détérioration inexpliquée des performances, la mise en place d'une procédure d'analyse multifactorielle (zootechnique, sanitaire et électrique) similaire à celle proposée par le GPSE (revue de Gallouin 2002) est recommandée. En effet, compte tenu des facteurs multiples pouvant influencer le comportement, la physiologie du stress et les performances, la résolution des éventuels problèmes électriques ne peut se faire sans le diagnostic complet de l'exploitation.

Dans ce diagnostic, l'utilisation de mesures physiologiques telles que la concentration plasmatique en cortisol n'est *a priori* pas pertinente. En effet, la concentration plasmatique en cortisol est très largement dépendante des conditions dans lesquelles sont réalisées les prélèvements sanguins, comme par exemple la manière d'effectuer le prélèvement (durée et habitude à l'expérimentateur...), l'heure de la journée, la température extérieure... Sans

animaux témoins soumis aux mêmes conditions environnementales, les données sont donc difficilement interprétables.

8. Perspectives

8.1. Meilleure caractérisation de la situation en élevage

Des enquêtes épidémiologiques ont été réalisées aux Etats-Unis (revue de NRAES 2003) ou au Canada (Rodenburg 1998) afin d'évaluer le nombre d'exploitations touchées par les courants électriques parasites. En France, à notre connaissance, aucun travail de cette envergure n'a été conduit. Il pourrait donc être intéressant de mettre en place une enquête épidémiologique dans les élevages français, associée à des mesures sur le terrain. Cette enquête devrait être réalisée sur un échantillon représentatif des systèmes d'élevages. En plus de la caractérisation précise de l'exploitation agricole notamment sur les plans électrique et zootechnique, il serait nécessaire de pouvoir mesurer, de façon fiable et répétable l'intensité du courant à laquelle sont soumis les animaux de l'élevage ainsi que les endroits précis de l'exposition au courant. Ce point supposerait la poursuite de la mise au point d'un appareillage de mesure embarqué déjà entamée par l'IUT du Limousin et CISTEME (Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, en ElectroMagnétisme et en Electronique), équipes avec lesquelles nous avons collaboré durant cette thèse (annexe 6). Le développement d'un tel outil serait un formidable moyen de connaissance des expériences « électriques » que les animaux d'élevage peuvent avoir au quotidien et viendrait compléter les mesures classiques déjà réalisées dans l'élevage.

8.2. Des effets différents suivant les caractéristiques des tensions électriques ?

8.2.1. Effets de tensions électriques continues

Les tensions électriques parasites présentes dans les élevages peuvent générer des courants alternatifs (souvent à la fréquence du réseau, c'est-à-dire 50 Hz) mais également des courants continus, notamment par le phénomène de couplage électrochimique. Par exemple un courant continu peut être créé entre deux métaux plongés dans un milieu humide conducteur, ce qui entraîne une réaction d'oxydoréduction de ces métaux. Cet effet pile est observable en élevage où les nombreuses pièces métalliques (poteaux, barrières,...) sont en contact avec un milieu humide (fumier et lisier notamment).

Des tensions continues jusqu'à 600 mV ont été mesurées en élevage porcin au niveau des cases à maternité et des abreuvoirs. Cependant aucun lien entre les tensions, le comportement et la production des animaux n'a été observé (Van der Heyde *et al.* 1995). Chez la vache, Gustafson *et al.* (1985) ont montré qu'une même réponse comportementale pouvait être obtenue avec un courant continu deux fois plus élevé qu'un courant alternatif pour un trajet museau-sabots, alors que c'était l'inverse pour un trajet sabots antérieurs-sabots postérieurs.

Néanmoins, les courants électriques continus ayant été peu étudiés, nous pouvons nous demander si le seuil de réponse à court terme des bovins à un courant électrique continu correspondrait au seuil observé avec un courant électrique alternatif, avec des effets à moyen terme similaires.

8.2.2. *Application des tensions électriques en salle de traite*

La salle de traite est évoquée à de nombreuses reprises (chapitre 1) comme étant un endroit privilégié pour les tensions électriques parasites en raison de la présence de matériel électrique (pompe à vide, tank de refroidissement,...) et de nombreuses masses métalliques (contention, lactoduc,...) et du fait que ce lieu soit particulièrement humide (eau de lavage des quais, déjections,...). De plus, l'exposition à un événement surprenant et inhabituel (bruit sourd et répété) ou l'injection d'adrénaline durant la traite inhibe l'éjection du lait (Ely et Petersen 1941). Les effets des tensions électriques parasites pourraient donc être plus importants sur la production laitière si ces tensions étaient appliquées en salle de traite, même si les expérimentations dans lesquelles une tension (ou un courant) électrique était appliquée en salle de traite n'ont pas montré d'effets sur la quantité ou la qualité du lait produit (Gorewit *et al.* 1985, Henke Drenkard *et al.* 1985, Gorewit et Scott 1986, Gorewit *et al.* 1992, Reinemann *et al.* 2002).

Ces expérimentations étant de courtes durées (généralement inférieures à 1 semaine), une expérimentation sur les effets à moyen terme des tensions parasites en salle de traite pourrait donc être intéressante à mettre en place. Toutefois, les contraintes techniques sont particulièrement lourdes et nécessiteraient probablement la construction d'une salle de traite dédiée à ces études, afin de maîtriser l'application de la tension sans « contamination » accidentelle des animaux témoins.

8.2.3. *Effets des tensions électriques en présence d'autres agents stressants*

En milieu contrôlé (cas des expérimentations), l'objectif est de faire varier un seul facteur à la fois afin d'étudier les seuls effets de ce facteur (ici la présence ou non de la tension électrique). La validité interne (mesure de fiabilité au sein d'un échantillon) est importante au détriment de la validité externe (le degré de généralisation des résultats). Or, en élevage, la probabilité de la présence simultanée de plusieurs agents stressants est loin d'être négligeable. Des études menées en élevage ont donc pour avantage d'avoir une validité externe importante au détriment de la validité interne.

L'étude des interactions entre les tensions électriques parasites et les autres agents stressants que les animaux peuvent rencontrer en élevage reste une problématique à approfondir, et pourrait éventuellement être envisagée en milieu contrôlé. A notre connaissance, seuls deux travaux se sont intéressés aux conséquences de la présence simultanée d'une tension électrique et d'un autre agent stressant. Chez le porc, la présence simultanée de tensions

électriques parasites et de la restriction alimentaire a entraîné des effets plus importants que si les tensions électriques étaient appliquées seules (Robert *et al.* 1991, 1992). Chez la volaille, les effets du courant électrique étaient identiques que celui-ci soit appliqué seul ou en association avec la manipulation, un environnement bruyant, une infestation expérimentale par des coccidies, une forte teneur en ammoniac ou un stress thermique (McFarlane *et al.* 1989). Chez les bovins, aucune étude ne semble avoir été conduite alors que de nombreux agents stressants sont susceptibles d'être présents simultanément en plus des courants parasites (réallotement, introduction de nouveaux animaux, promiscuité avec l'éleveur, nombreuses manipulations...).

L'étude des interactions entre les tensions électriques parasites et d'autres agents stressants pourrait donc permettre de mieux comprendre les différences entre observations en élevage et résultats expérimentaux de la littérature.

8.2.4. Effets à moyen terme d'un courant électrique d'intensité plus importante

Il serait pertinent d'étudier les réponses comportementales, physiologiques et zootechniques à moyen terme d'animaux soumis à des courants électriques d'intensité plus élevée. En effet, dans certaines situations d'élevage, les animaux peuvent être soumis à des courants électriques plus élevés que ceux utilisés lors de cette thèse. Par exemple, en Amérique du Nord, en raison du système de distribution électrique, les animaux peuvent être soumis plus fréquemment qu'en France à des tensions proches de 10 V. En France, les installations électriques sont protégées par des disjoncteurs différentiels généralement d'une sensibilité de 30 mA (AFNOR 1956). Ce type de disjoncteur coupe le circuit électrique dès qu'un courant de court-circuit dépasse la valeur de sensibilité (Bourget *et al.* 2000). En élevage, il est donc possible, en cas de courant de fuite et de défaut de mise à la terre, que des courants jusqu'à 30 mA circulent dans les structures. Ce niveau de courant est plus de 8 fois plus élevé que celui auquel était soumis les vaches lors de cette thèse (3,6 mA). Dans ce cas, si le problème était détecté tardivement, une des conséquences pourrait être la présence d'un stress chronique, y compris chez des animaux soumis en permanence à de tels courants.

8.2.5. Variabilité individuelle

Les résultats de cette thèse montrent une variabilité individuelle de réponse aux tensions électriques importante. Il serait intéressant de mieux comprendre cette variabilité individuelle notamment par :

- des mesures de la résistance et de ses facteurs de variation liés à l'animal (poids, taille, note d'état corporel...), à la façon dont l'animal touche le dispositif, à l'environnement (type de sol, d'ambiance....)
- l'utilisation d'analyses multi-variées pour tenter de classer les animaux selon leurs réponses à des agents stressants. Par exemple, il pourrait être intéressant d'étudier si les animaux les

plus forts producteurs ou à fort taux de cellules initial sont également ceux pour lesquels potentiellement les effets des tensions électriques sont les plus prononcés.

- l'étude des caractéristiques des individus afin de dégager des typologies d'individus plus ou moins « robustes » c'est-à-dire présentant plus ou moins de réponses aux tensions électriques parasites ou s'adaptant mieux (plus rapidement et à moindre coût).

Références bibliographiques

- Adamec R., Walling S., Burton P., 2004. Long-lasting, selective, anxiogenic effects of feline predator stress in mice. *Physiology & Behavior*, 83, 401-410.
- AFNOR, 1956. NF C15-100, article 322-2.
- Alam M.G., Dobson H., 1986. Effect of various veterinary procedures on plasma concentrations of cortisol, luteinising hormone and prostaglandin F2 alpha metabolite in the cow. *Veterinary Record*, 118, 7-10.
- Andrade O., Orihuela A., Solano J., Galina C.S., 2001. Some effects of repeated handling and the use of a mask on stress responses in zebu cattle during restraint. *Applied Animal Behaviour Science*, 71, 175-181.
- Aneshansley D.J., Gorewit R.C. 1991. Physiological and behavioral effects. In "Effects of electrical voltage/current on farm animals. How to detect and remedy problems" (A.M. Lefcourt, ed.), Vol. 696, pp. 1-23. Agriculture handbook.
- Aneshansley D.J., Gorewit R.C., Price L.R., 1992. Cow sensitivity to electricity during milking. *Journal of Dairy Science*, 75, 2733-2741.
- Arnold N.A., Ng K.T., Jongman E.C., Hemsworth P.H., 2007. The behavioural and physiological responses of dairy heifers to tape-recorded milking facility noise with and without a pre-treatment adaptation phase. *Applied Animal Behaviour Science*, 106, 13-25.
- Bassett L., Buchanan-Smith H.M., 2007. Effects of predictability on the welfare of captive animals. *Applied Animal Behaviour Science*, 102, 223-245.
- Bernard L., 2007. Caractérisation électrique des tissus biologiques et calcul des phénomènes induits dans le corps humain par des champs électromagnétiques de fréquence inférieure au GHz, Ecole Centrale de Lyon. 108 pp.
- Blatin D., Benetière J.J. 1998. "Influence sur les élevages des champs électromagnétiques induits par les lignes électriques à haute tension," Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris.
- Bøe K.E., Færevik G., 2003. Grouping and social preferences in calves, heifers and cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 80, 175-190.
- Boissy A., Bouissou M.F., 1995. Assessment of individual differences in behavioural reactions of heifers exposed to various fear-eliciting situations. *Applied Animal Behaviour Science*, 46, 17-31.
- Boissy A., Le Neindre P., 1997. Behavioral, cardiac and cortisol responses to brief peer separation and reunion in cattle. *Physiology & Behavior*, 61, 693-699.
- Boissy A., C. Terlouw, and P. Le Neindre. 1998. Presence of cues from stressed conspecifics increases reactivity to aversive events in cattle: evidence for the existence of alarm substances in urine. *Physiology & Behaviour* 63, 489-495.
- Boissy A., Veissier I., Roussel S., 2001. Behavioural reactivity affected by chronic stress: An experimental approach in calves submitted to environmental instability. *Animal Welfare*, 10, S175-S185.
- Boissy A., Bouix J., Orgeur P., Poindron P., Bibé B., Le Neindre P., 2005. Genetic analysis of emotional reactivity in sheep: effects of the genotypes of the lambs and of their dams. *Genetics Selection Evolution*, 37, 381 - 401.
- Boissy A., Arnould C., Chaillou E., Colson V., Desire L., Duvaux-Ponter C., Greiveldinger L., Leterrier C., Richard S., Roussel S., Saint-Dizier H., Meunier-Salaün M.C., Valance D., 2007a. Emotions et cognition : stratégie pour répondre à la question de la sensibilité des animaux. *INRA Productions Animales*, 20, 17-21.
- Boissy A., Manteuffel G., Jensen M.B., Moe R.O., Spruijt B., Keeling L.J., Winckler C., Forkman B., Dimitrov I., Langbein J., Bakken M., Veissier I., Aubert A., 2007b. Assessment of positive emotions in animals to improve their welfare. *Physiology & Behavior*, 92, 375-397.

- Boivin X., Le Neindre P., Boissy A., Lensink J., Trillat G., Veissier I., 2003. Eleveur et grands herbivores : une relation à entretenir. INRA Productions Animales, 16, 101-115.
- Bouissou M.F., 1992. La relation Homme-Animal. Conséquences et possibilités d'amélioration. INRA Productions Animales, 5, 303-318.
- Bourget M., Brugère H., Gallouin F., Lemeray P., Picou P., Vauge C., EDF, 2000. "Mieux connaître les risques des courants électriques parasites dans les exploitations d'élevage. Plaquette préparée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, EDF-RTE, PROMOTELEC, l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture et GROUPAMA," Paris - La Défense, France. 38 pp.
- Bradley B.P., Mogg K., Lee S.C., 1997. Attentional biases for negative information in induced and naturally occurring dysphoria. Behaviour Research and Therapy, 35, 911-927.
- Bressou C., 1978. "Anatomie régionale des animaux domestiques. II Les ruminants," J.B. Baillière. Paris (France). 438 pp.
- Breuer K., Hemsworth P.H., Barnett J.L., Matthews L.R., Coleman G.J., 2000. Behavioural response to humans and the productivity of commercial dairy cows. Applied Animal Behaviour Science, 66, 273-288.
- Broom D.M., Johnson K.G., 1993. "Stress and Animal Welfare," D.M. Broom. Chapman & Hall, London (United-Kingdom). 211 pp.
- Brugère H., 1993. La sensibilité des bovins aux tensions parasites. Bulletin de la Société vétérinaire pratique de France, 77, 183-191.
- Brugère H., 2002. Effets du courant électrique sur les animaux d'élevage. Bulletin de la Société vétérinaire pratique de France, 86, 182-196.
- Buckham Sporer K.R., Burton J.L., Earley B., Crowe M.A., 2007. Transportation stress in young bulls alters expression of neutrophil genes important for the regulation of apoptosis, tissue remodeling, margination, and anti-bacterial function. Veterinary Immunology and Immunopathology, 118, 19-29.
- Cannon W.B., 1932. "The wisdom of the body," W.W. Norton. New-York (USA). 312 pp.
- Cannon W.B., 1935. Stresses and strains of homeostasis. The American Journal of Medical Sciences, 189, 1-14.
- Carlstead K., 1986. Predictability of feeding: Its effect on agonistic behaviour and growth in grower pigs. Applied Animal Behaviour Science, 16, 25-38.
- Chaoulhoff F., Berton O., Mormède P., 1999. Serotonin and Stress. Neuropsychopharmacology, 21, 28S-32S.
- Churchward R.E., 1948. A note on the occurrence of electric shocks from milking machines and their possible effect on development of mastitis. Australian Veterinary Journal, 24, 150.
- Code Rural, 2000. Modalités du paiement du lait de vache en fonction de sa composition et de sa qualité. Articles L654-28 à D654-34.
- Commission Regulation (EEC) No 461/93, 1993 of 26 February laying down detailed rules for the Community scale for the classification of carcasses of ovine animals.
- Coulon J.B., Pérochon L., 2000. Evolution de la production laitière au cours de la lactation : modèle de prédiction chez la vache laitière. INRA Productions Animales, 13, 349-360.
- Coutellier L., Arnould C., Boissy A., Orgeur P., Prunier A., Veissier I., Meunier-Salaün M.-C., 2007. Pig's responses to repeated social regrouping and relocation during the growing-finishing period. Applied Animal Behaviour Science, 105, 102-114.
- Dantzer R., Mormède P., 1979. "Le stress en élevage intensif," I.e. Masson. Paris/Barcelone/Milan/Mexico. 117 pp.

- Darwin C., 1872. "The Expression of the Emotions in Man and Animals," J. Murray. London (United-Kingdom). 374 pp.
- Dénès P., 2007. Qualité du lait - Courants de fuite : l'installation électrique peut avoir une influence. Paysan Breton, N° du 12 au 18 mai 2007, 16.
- Deschamps F., 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. Bulletin de la Société vétérinaire pratique de France, 86, 174-181.
- Désiré L., 2004. Etude des processus cognitifs impliqués dans la différenciation des émotions chez l'agneau (*Ovis aries*), Université de Clermont-Ferrand 2, Aubière (France). 197 pp.
- Désiré L., Veissier I., Després G., Boissy A., 2004. On the way to assess emotions in animals: do lambs (*Ovis aries*) evaluate an event through its suddenness, novelty, or unpredictability? Journal of Comparative Psychology, 118, 363-374.
- Désiré L., Veissier I., Després G., Delval E., Toporenko G., Boissy A., 2006. Appraisal process in sheep (*Ovis aries*): interactive effect of suddenness and unfamiliarity on cardiac and behavioral responses. Journal of Comparative Psychology, 120, 280-287.
- Devenport L., Knehans A., Sundstrom A., Thomas T., 1989. Corticosterone's dual metabolic actions. Life Sciences, 45, 1389-1396.
- Dobson H., Smith R.F., 2000. What is stress, and how does it affect reproduction? Animal Reproduction Science, 60-61, 743-752.
- Dohoo I.R., Meek A.H., 1982. Somatic cell counts in bovine milk. Canadian Veterinary Journal, 23, 119-125.
- Duvaux-Ponter C., Roussel S., Deschamps F., 2005. Determination of a stray voltage threshold leading to aversion in sheep. In "Proceedings of the 39th International Congress of the International Society for Applied Ethology" (R. Kusunose and S. Sato, eds.), pp. 130, Sagamihara (Japan).
- Duvaux-Ponter C., Roussel S., Ennifar M., Fortin F., Louyot T., 2006. It is easier to define the aversiveness threshold of stray voltage when animals are allowed to avoid it. In "Proceedings of the 40th International Congress of the International Society for Applied Ethology" (M. Mendl, ed.), pp. 221, Bristol (Royaume-Uni).
- Edwards A.V., Jones C.T., 1993. Autonomic control of adrenal-function. Journal of Anatomy, 183, 291-307.
- El Hage W., Griebel G., Belzung C., 2006. Long-term impaired memory following predatory stress in mice. Physiology & Behavior, 87, 45-50.
- Ely F., Petersen W.E., 1941. Factors involved in the ejection of milk. Journal of Dairy Science, 24, 211-223.
- Ernst K., Tuchscherer M., Kanitz E., Puppe B., Manteuffel G., 2006. Effects of attention and rewarded activity on immune parameters and wound healing in pigs. Physiology & Behavior, 89, 448-456.
- Ewbank R. 1992. Stress a general overview. In "Farm animals and the environment" (J.C. Phillips and D. Piggins, eds.), pp. 255-262. CAB International, Wallingford (United-Kingdom).
- Farm Animal Welfare Council, 1992. FAWC updates the five freedoms. Veterinary Record, 17, 357.
- Fisher A.D., Crowe M.A., O'Kiely P., Enright W.J., 1997. Growth, behaviour, adrenal and immune responses of finishing beef heifers housed on slatted floors at 1.5, 2.0, 2.5 or 3.0 m² space allowance. Livestock Production Science, 51, 245-254.
- Forkman B., Boissy A., Meunier-Salaün M.C., Canali E., Jones R.B., 2007. A critical review of fear tests used on cattle, pigs, sheep, poultry and horses. Physiology & Behavior, 92, 340-374.

- Gabriel, C., S. Gabriel, and E. Corthout. 1996a. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Phys. Med. Biol.* 41(11):2231-2249.
- Gabriel C., Gabriel S., Corthout E., 1996b. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in Medicine and Biology*, 41, 2231-49.
- Gallouin F., 2002. Le Groupe Permanent sur la Sécurité Electrique (GPSE) dans les élevages agricoles et aquacoles, après deux ans de fonctionnement. *Bulletin de la Société vétérinaire pratique de France*, 86, 197-204.
- Garnier M., Delamare V., 1985. "Dictionnaire des termes techniques de médecine," Maloine. Paris. 1215 pp.
- Geddes L.A., Baker L.E., 1967. The specific resistance of biological material - a compendium of data for the biomedical engineer and physiologist. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 5, 271-293.
- Gibbons J., Lawrence A., Haskell M., 2009. Responsiveness of dairy cows to human approach and novel stimuli. *Applied Animal Behaviour Science*, 116, 163-173.
- Godcharles, L., S. Robert, J. J. Matte, J. Bertin-Mahieux, and G. P. Martineau. 1993. Transient stray voltage: Is it detrimental to growth performance, health status and welfare of market pigs? *Veterinary Research Communications*, 17, 41-53.
- Gorewit R.C., Scott N.R., Czarniecki C.S., 1985. Responses of dairy cows to alternating electrical current administered semi-randomly in a non-avoidance environment. *Journal of Dairy Science*, 68, 718-725.
- Gorewit, R. C. and N. R. Scott. 1986. Cardiovascular responses of cows given electrical current during milking. *Journal of Dairy Science*, 69, 1122-1127.
- Gorewit R.C., Aneshansley D.J., Ludington D.C., Pellerin R.A., Zhao X., 1989. AC voltages on water bowls: effects on lactating Holsteins. *Journal of Dairy Science*, 72, 2184-2192.
- Gorewit R.C., Aneshansley D.J., Price L.R., 1992. Effects of voltages on cows over a complete lactation .1. Milk-yield and composition. *Journal of Dairy Science*, 75, 2719-2725.
- Greiveldinger L., Veissier I., Boissy A., 2007. Emotional experience in sheep: Predictability of a sudden event lowers subsequent emotional responses. *Physiology & Behavior*, 92, 675-683.
- Groves P.M., Thompson R.F., 1970. Habituation: A dual-process theory. *Psychological Review*, 77, 419-450.
- Gustafson R.J., Brennan T.M., Appleman R.D., 1985. Behavioral studies of dairy cows sensitivity to AC and DC electric currents. *Transactions of the ASAE*, 28, 1680-1685.
- Harmon R.J., 1994. Physiology of mastitis and factors affecting somatic cell counts. *Journal of Dairy Science*, 77, 2103-2112.
- Hasegawa N., Nishiwaki A., Sugawara K., Ito I., 1997. The effects of social exchange between two groups of lactating primiparous heifers on milk production, dominance order, behavior and adrenocortical response. *Applied Animal Behaviour Science*, 51, 15-27.
- Haskell M.J., Coerse N.C.A., Taylor P.A.E., McCorquodale C., 2004. The effect of previous experience over control of access to food and light on the level of frustration-induced aggression in the domestic hen. *Ethology*, 110, 501-513.
- Hemsworth P.H., Barnett J.L., Hansen C., 1987. The influence of inconsistent handling by humans on the behaviour, growth and corticosteroids of young pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, 17, 245-252.
- Hemsworth P.H., Barnett J.L., Coleman G.J., 1993. The human-animal relationship in agriculture and its consequences for the animal. *Animal Welfare*, 2, 33-51.

- Hemsworth P.H., Barnett J.L., Beveridge L., Matthews L.R., 1995. The welfare of extensively managed dairy cattle: A review. *Applied Animal Behaviour Science*, 42, 161-182.
- Henke Drenkard D.V., Gorewit R.C., Scott N.R., Sagi R., 1985. Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *Journal of Dairy Science*, 68, 2694-2702.
- Hopster H., Blokhuis H.J., 1994. Validation of a heart-rate monitor for measuring a stress response in dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*, 74, 465-474.
- Hopster H., O'Connell J.M., Blokhuis H.J., 1995. Acute effects of cow-calf separation on heart rate, plasma cortisol and behaviour in multiparous dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 44, 1-8.
- Hopster H., van der Werf J.T.N., Blokhuis H.J., 1998. Side preference of dairy cows in the milking parlour and its effects on behaviour and heart rate during milking. *Applied Animal Behaviour Science*, 55, 213-229.
- Huber D., Veinante P., Stoop R., 2005. Vasopressin and oxytocin excite distinct neuronal populations in the central amygdala. *Science*, 308, 245-248.
- Hultgren J., 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Veterinary Research Communications*, 14, 287-298.
- IASP, 1979. International Association For the Study of Pain, Definition of Pain, <http://www.iasp-pain.org>. Page consultée le 29 septembre 2009.
- Iny L.J., Gianoulakis C., Palmour R.M., Meaney M.J., 1987. The [beta]-endorphin response to stress during postnatal development in the rat. *Developmental Brain Research*, 31, 177-181.
- IUMT, 2009. Les électrisations, http://www.med.univ-rennes1.fr/etud/med_travail/cours/electrisations.html. Page consultée le 26 août 2009.
- Janssens C.J.J.G., Helmond F.A., Weigant V.M., 1995. The effect of chronic stress on plasma cortisol concentrations in cyclic female pigs depends on the time of day. *Domestic Animal Endocrinology*, 12, 167-177.
- Jaspard F., Nadi M., Rouane A., 2003. Dielectric properties of blood : an investigation of haematocrit dependence. *Physiological Measurement*, 24, 137-147.
- Jensen M.B., 1999. Adaptation to tethering in yearling dairy heifers assessed by the use of lying down behaviour. *Applied Animal Behaviour Science*, 62, 115-123.
- Jordan E.R., 2003. Effects of heat stress on reproduction. *Journal of Dairy Science*, 86, 104-114.
- Juarez S.T., Robinson P.H., DePeters E.J., Price E.O., 2003. Impact of lameness on behavior and productivity of lactating Holstein cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 83, 1-14.
- Kanitz E., Tuchscherer M., Puppe B., Tuchscherer A., Stabenow B., 2004. Consequences of repeated early isolation in domestic piglets (*Sus scrofa*) on their behavioural, neuroendocrine, and immunological responses. *Brain, Behavior, and Immunity*, 18, 35-45.
- Kramer K.M., Cushing B.S., Carter C.S., 2003. Developmental effects of oxytocin on stress response: single versus repeated exposure. *Physiology & Behavior*, 79, 775-782.
- Ladewig J., Smidt D., 1989. Behavior, episodic secretion of cortisol, and adrenocortical reactivity in bulls subjected to tethering. *Hormones and Behavior*, 23, 344-360.
- Lasseret V., 2001. Courants parasites électriques. A surveiller...sans s'alarmer ! *Jeunes Agriculteurs*, 558.
- Le Neindre P., Boivin X., Boissy A., 1996. Handling of extensively kept animals. *Applied Animal Behaviour Science*, 49, 73-81.

- Lefcourt, A. M. 1982. Behavioral responses of dairy cows subjected to controlled voltages. *Journal of Dairy Science*, 65, 672-674.
- Lefcourt A.M., Akers R.M., 1982. Endocrine responses of cows subjected to controlled voltages during milking. *Journal of Dairy Science*, 65, 2125-2130.
- Lefcourt, A. M., R. M. Akers, R. H. Miller, and B. Weinland. 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *Journal of Dairy Science*, 68, 391-401.
- Lefcourt A.M., Kahl S., Akers R.M., 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *Journal of Dairy Science*, 69, 833-842.
- Lefcourt A.M., 1991. "Effects of electrical voltage/current on farm animals: How to detect and remedy problems. U.S. Departement of Agriculture, Agricultural Handbook No 696," A.M. Lefcourt. 142 pp.
- Lensink J., Veissier I., Boissy A., 2006. Enhancement of performances in a learning task in suckler calves after weaning and relocation: motivational versus cognitive control? A pilot study. *Applied Animal Behaviour Science*, 100, 171-181.
- Ley S.J., Waterman A.E., Livingston A., 1996. Measurement of mechanical thresholds, plasma cortisol and catecholamines in control and lame cattle: A preliminary study. *Research in Veterinary Science*, 61, 172-173.
- Lindqvist C., Jensen P., 2009. Domestication and stress effects on contrafreeloading and spatial learning performance in red jungle fowl (*Gallus gallus*) and White Leghorn layers. *Behavioural Processes*, 81, 80-84.
- Martin D., 2008. Electricité sadique. *ARCA magazine*, 29, 56-59.
- Mason J.W., 1971. A re-evaluation of the concept of "non-specificity" in stress theory. *Journal of Psychiatric Research*, 8, 323-333.
- McFarland D., d'Huart J., Zayan R., 2001. "Le comportement animal : psychobiologie, éthologie et évolution " D.B. Universités. Paris. 613 pp.
- McFarlane J.M., Curtis S.E., Shanks R.D., Carmer S.G., 1989. Multiple concurrent stressors in chicks. 1. Effect on weight gain, feed intake, and behavior. *Poultry Science*, 68, 501-509.
- McLean J.A., Savory C.J., Sparks N.H.C., 2002. Welfare of male and female broiler chickens in relation to stocking density, as indicated by performance, health and behaviour. *Animal Welfare*, 11, 55-73.
- Mears G.J., Brown F.A., Redmont L.R., 1999. Effects of handling, shearing and previous exposure to shearing on cortisol and beta-endorphin responses in ewes. *Canadian Journal of Animal Science*, 79, 35-38.
- Mendl M., 1999. Performing under pressure: stress and cognitive function. *Applied Animal Behaviour Science*, 65, 221-244.
- Merlot E., 2004. Conséquences du stress sur la fonction immunitaire chez les animaux d'élevage. *INRA Productions Animales*, 17, 255-264.
- Meunier-Salaün M.C., Vantrimpont M.N., Raab A., Dantzer R., 1987. Effect of floor area restriction upon performance, behavior and physiology of growing-finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 64, 1371-1377.
- Mineka S., Hendersen R.W., 1985. Controllability and predictability in acquired motivation. *Annual Review of Psychology*, 36, 495-529.
- Molony V., Kent J.E., 1997. Assessment of acute pain in farm animals using behavioral and physiological measurements. *Journal of Animal Science*, 75, 266-272.
- Morgan C.A., Lawrence A.B., Chirnside J., Deans L.A., 2001. Can information about solid food be transmitted from one piglet to another? *Animal Science*, 73, 471-478.
- Mormède P., 1995. Le stress : interaction animal-homme-environnement. *Cahiers Agricultures*, 4, 275-286.

- Mormède, P., S. Andanson, B. Auperin, B. Beerda, D. Guemene, J. Malmkvist, X. Manteca, G. Manteuffel, P. Prunet, C. G. van Reenen, S. Richard, and I. Veissier. 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiology & Behavior*, 92, 317-339.
- Morrison R.S., Johnston L.J., Hilbrands A.M., 2007. The behaviour, welfare, growth performance and meat quality of pigs housed in a deep-litter, large group housing system compared to a conventional confinement system. *Applied Animal Behaviour Science*, 103, 12-24.
- Norell, R. J., R. J. Gustafson, R. D. Appleman, and J. B. Overmier. 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Transactions of the ASAE*, 26, 1506-1511.
- NRAES, 2003. "Stray voltage and dairy farms," NRAES. Camp Hill (PA, USA). 408 pp.
- Okeudo, N. J. and B. W. Moss. 2005. Interrelationships amongst carcass and meat quality characteristics of sheep. *Meat Science*, 69, 1-8.
- Overmier J.B., Patterson J., Wielkiewicz R.M. 1980. Environmental contingencies as sources of stress in animals. *In "Coping and Health"* (S. Levine and H. Ursin, eds.), pp. 1-38. Plenum Press, New York, USA.
- Paape M.J., Kral A.J., Desjardins C., Schultze W.D., Miller R.H., 1973a. Failure of either corticosteroids, or ACTH to increase the leukocyte concentration in milk. *American Journal of Veterinary Research*, 34, 353-356.
- Paape M.J., Schultze W.D., Miller R.H., Smith J.W., 1973b. Thermal stress and circulating erythrocytes, leucocytes, and milk somatic cells. *Journal of Dairy Science*, 56, 84-91.
- Parrott R.F. 1990. Physiological responses to isolation in sheep. *In "Social stress in domestic animals"* (R. Zayan and R. Dantzer, eds.), pp. 212-226. Kluwer Academic Press, Boston-Dordrecht.
- Paul E.S., Harding E.J., Mendl M., 2005. Measuring emotional processes in animals: the utility of a cognitive approach. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 29, 469-491.
- Peyman A., Rezazadeh A.A., Gabriel C., 2001. Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies. *Physics in Medicine and Biology*, 46, 1617-1629.
- Price E.O., Thos J., 1980. Behavioural responses to short-term social isolation in sheep and goats. *Applied Animal Ethology*, 6, 331-339.
- Przekop F., Stupnicka E., Wolinska-Witort E., Mateusiak K., Sadowski B., Domanski E., 1985. Changes in circadian rhythm and suppression of the plasma cortisol level after prolonged stress in the sheep. *Acta endocrinologica*, 110, 540-545.
- Puppe B., Ernst K., Schön P.C., Manteuffel G., 2007. Cognitive enrichment affects behavioural reactivity in domestic pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, 105, 75-86.
- Raussi S., Boissy A., Delval E., Pradel P., Kaihilahti J., Veissier I., 2005. Does repeated regrouping alter the social behaviour of heifers? *Applied Animal Behaviour Science*, 93, 1-12.
- Reefmann N., Bütikofer Kaszàs F., Wechsler B., Gygax L., 2009. Ear and tail postures as indicators of emotional valence in sheep. *Applied Animal Behaviour Science*, 118, 199-207.
- Reinemann, D. J., L. G. Sheffield, S. D. LeMire, M. D. Rasmussen, and M. C. Wiltbank. 1999a. Dairy cow response to electrical environment - final report - part III. Immune function response to low-level electrical current exposure Report to the Minnesota Public Utilities Commission, June, 30 1999:19 pp.
- Reinemann, D. J., L. E. Stetson, J. P. Reilly, and N. K. Laughlin. 1999b. Dairy cow sensitivity to short duration electrical currents. *Transactions of the ASAE*, 42, 215-222.

- Reinemann, D. J., M. D. Rasmussen, and S. D. LeMire. 2002. Milking performance of dairy cows subjected to electrical current and induced milking machine problems. *Transactions of the ASAE*, 45, 833-838.
- Reinemann D.J., Wiltbank M.C., Rasmussen M.D., Sheffield L.G., LeMire S.D., 2003. Comparison of behavioral to physiological response of cows exposed to electric shock. *Transactions of the ASAE*, 46, 507-512.
- Reinemann D.J., Stetson L.E., Laughlin N.E., LeMire S.D., 2005. Water, feed, and milk production response of dairy cattle exposed to transient currents. *Transactions of the ASAE*, 48, 385-392.
- Reinemann D.J. 2008. "Literature review and synthesis of research findings on the impact of stray voltage on farm operations." Report to the Ontario Energy Board, 70 pp.
- Reisberg D., Heuer F. 1995. Emotion's multiple effects on memory. In "Brain and memory: modulation and mediation of neuroplasticity. " (J.L. McGaugh, N.M. Weiberger and G. Lynch, eds.), pp. 84-92. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Remience V., Wavreille J., Canart B., Meunier-Salaün M.-C., Prunier A., Bartiaux-Thill N., Nicks B., Vandenheede M., 2008. Effects of space allowance on the welfare of dry sows kept in dynamic groups and fed with an electronic sow feeder. *Applied Animal Behaviour Science*, 112, 284-296.
- Robert, S., J. J. Matte, J. Bertin-Mahieux, and G. P. Martineau. 1991. Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Canadian Journal of Veterinary Research*, 55, 371-376.
- Robert, S., J. J. Matte, J. Bertin-Mahieux, and G. P. Martineau. 1992. Stray voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Canadian Journal of Animal Science*, 72, 467-475.
- Rodenburg J., 1998. Stray voltage problems in livestock production, <http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/strayvol.htm>. Page consultée le 16 mars 2009.
- Rosenvold, K. and H. J. Andersen. 2003. Factors of significance for pork quality--a review. *Meat Science*, 64, 219-237.
- Roussel S., Boissy A., Tessier J., Hemsworth P.H., Duvaux-Ponter C., 2005. Does stress imposed on pregnant goats affect the stress physiology and behaviour of their kids? . *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 4, 287-294.
- RTE, 2009. Comprendre qu'est ce que l'électricité ?, http://www.rte-france.com/htm/fr/CEM_HTML/electricite/index.jsp. Page consultée le 27 août 2009.
- Rudramma B.G., Varshney V.P., Satish K.J., B., Sanwal P.C., 2003. Cortisol and catecholamine profile in goats subjected to restraint and isolation stress. *Indian Journal of Animal Sciences*, 73, 376-380
- Rupp R., Boichard D., 2000. Numérations cellulaires du lait et mammites cliniques : relations phénotypique et génétique chez les vaches Prim'Holstein. *INRA Productions Animales*, 14, 193-200.
- Sambrook T.D., Buchanan-Smith H.M., 1997. Control and complexity in novel object enrichment. *Animal Welfare*, 6, 207-216.
- Sandem A.I., Braastad B.O., Bøe K.E., 2002. Eye white may indicate emotional state on a frustration-contentedness axis in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 79, 1-10.
- Sandem A.I., Janczak A.M., Braastad B.O., 2004. A short note on effects of exposure to a novel stimulus (umbrella) on behaviour and percentage of eye-white in cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 89, 309-314.

- Sandem A.-I., Braastad B.O., 2005. Effects of cow-calf separation on visible eye white and behaviour in dairy cows--A brief report. *Applied Animal Behaviour Science*, 95, 233-239.
- Sandem, A. I., A. M. Janczak, R. Salte, and B. O. Braastad. 2006a. The use of diazepam as a pharmacological validation of eye white as an indicator of emotional state in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 96, 177-183.
- Sandem A.-I., Braastad B.O., Bakken M., 2006b. Behaviour and percentage eye-white in cows waiting to be fed concentrate--A brief report. *Applied Animal Behaviour Science*, 97, 145-151.
- Sapolsky R.M., Romero L.M., Munck A.U., 2000. How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocrine Reviews*, 21, 55-89.
- Sawyer D.C., 1998. Pain control in small-animal patients. *Applied Animal Behaviour Science*, 59, 135-146.
- Schmied C., Waiblinger S., Scharl T., Leisch F., Boivin X., 2008. Stroking of different body regions by a human: Effects on behaviour and heart rate of dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 109, 25-38.
- Selye H., 1973. The evolution of the stress concept. *American Scientist*, 61, 692-699.
- Selye H., 1976. "The stress of life," M.-H.B. Co., New-York. 516 pp.
- Siegford J.M., Rucker G., Zanella A.J., 2008. Effects of pre-weaning exposure to a maze on stress responses in pigs at weaning and on subsequent performance in spatial and fear-related tests. *Applied Animal Behaviour Science*, 110, 189-202.
- Simonsen H.B., 1979. Grooming behaviour of domestic cattle. *Nordisk veterinærmedicin Nord. Vet.-Med.*, 31, 1-5.
- Southwick, L. H., D. J. Wilson, and P. M. Sears. 1992. Milk production, water consumption, and somatic cell count responses of cows subject to one or two volts of alternating current. *J Journal of the American Veterinary Medical Association*, 201, 441-444.
- Stehulová I., Lidfors L., Spinka M., 2008. Response of dairy cows and calves to early separation: Effect of calf age and visual and auditory contact after separation. *Applied Animal Behaviour Science*, 110, 144-165.
- Takeda K.I., Sato S., Sugawara K., 2003. Familiarity and group size affect emotional stress in Japanese Black heifers. *Applied Animal Behaviour Science*, 82, 1-11.
- Touraine P., Goffin V., 2005. Physiologie de la prolactine. *EMC - Endocrinologie*, 2, 50-76.
- Valiquette S., Bergeron R., Geoffroy J.L., Martineau G.P., Robert S., Matte J.J., 1994. Current and impedance in fattening pigs: effects of biological and environmental parameters. In "International Winter Meeting" (ASAE, ed.), 10 pp., Atlanta (Georgia, USA).
- Van der Heyde H., Demets J.P., Henderickx H., Debruyckere M., 1995. Electrical tensions on farrowing house equipment. *Transactions of the ASAE*, 38, 611-615.
- Van Tien D., Lynch J.J., Hinch G.N., Nolan J.V., 1999. Grass odor and flavor overcome feed neophobia in sheep. *Small Ruminant Research*, 32, 223-229.
- Vandenheede M., Bouissou M.F., 1993. Sex differences in fear reactions in sheep. *Applied Animal Behaviour Science*, 37, 39-55.
- Veissier I., Sarignac C., Capdeville J., 1999. Les méthodes d'appréciation du bien-être des animaux d'élevage. *INRA Productions Animales*, 12, 113-121.
- Veissier I., Boissy A., de Passille A.M., Rushen J., van Reenen C.G., Roussel S., Andanson S., Pradel P., 2001. Calves' responses to repeated social regrouping and relocation. *Journal of Animal Science*, 79, 2580-2593.

- Veissier I., Boissy A., 2007. Stress and welfare: Two complementary concepts that are intrinsically related to the animal's point of view. *Physiology & Behavior*, 92, 429-433.
- Vieuille-Thomas, C. and J. P. Signoret. 1992. Pheromonal transmission of an aversive experience in domestic pig. *Journal of Chemical Ecology*, 18, 1551-1557.
- Waiblinger S., Menke C., Coleman G., 2002. The relationship between attitudes, personal characteristics and behaviour of stockpeople and subsequent behaviour and production of dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science*, 79, 195-219.
- Waiblinger S., Menke C., Korff J., Bucher A., 2004. Previous handling and gentle interactions affect behaviour and heart rate of dairy cows during a veterinary procedure. *Applied Animal Behaviour Science*, 85, 31-42.
- Waiblinger S., Boivin X., Pedersen V., Tosi M.-V., Janczak A.M., Visser E.K., Jones R.B., 2006. Assessing the human-animal relationship in farmed species: A critical review. *Applied Animal Behaviour Science*, 101, 185-242.
- Walker S.L., Smith R.F., Routly J.E., Jones D.N., Morris M.J., Dobson H., 2008. Lameness, activity time-budgets, and estrus expression in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 91, 4552-4559.
- Waynert, D. F., J. M. Stookey, K. S. Schwartzkopf-Genswein, J. M. Watts, and C. S. Waltz. 1999. The response of beef cattle to noise during handling. *Applied Animal Behaviour Science*, 62, 27-42.
- Weary D.M., Chua B., 2000. Effects of early separation on the dairy cow and calf: 1. Separation at 6 h, 1 day and 4 days after birth. *Applied Animal Behaviour Science*, 69, 177-188.
- Wechsler B., Lea S.E.G., 2007. Adaptation by learning: Its significance for farm animal husbandry. *Applied Animal Behaviour Science*, 108, 197-214.
- Wegner T.N., Schuh J.D., Nelson F.E., Stott G.H., 1976. Effect of Stress on blood leucocyte and milk somatic cell counts in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 59, 949-956.
- Weinberg J., Levine S. 1980. Psychobiology of coping in animals: the effects of predictability. In "Coping and Health" (S. Levine and H. Ursin, eds.), pp. 39-59. Plenum Press, New York, USA.
- West J.W., 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86, 2131-2144.
- Wright W.F., Bower G.H., 1992. Mood effects on subjective probability assessment. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 52, 276-291.
- Wurtman R.J., Axelrod J., 1966. Control of enzymatic synthesis of adrenaline in the adrenal medulla by adrenal corticoid steroids. *Journal of Biological Chemistry*, 241, 2301-2305.
- Yagi Y., Shiono H., Chikayama Y., Ohnuma A., Nakamura I., Yayou K.I., 2004. Transport stress increases somatic cell counts in milk, and enhances the migration capacity of peripheral blood neutrophils of dairy cows. *Journal of Veterinary Medical Science*, 66, 381-387.
- Zanella A.J., Broom D.M., Hunter J.C., Mendl M.T., 1996. Brain opioid receptors in relation to stereotypies, inactivity, and housing in sows. *Physiology & Behavior*, 59, 769-775.
- Zayan R. 1990. Perspectives in the study of social stress. In "Social stress in domestic animals" (R. Zayan and R. Dantzer, eds.), pp. 31-69. Kluwer Academic Press, Boston-Dordrecht.
- Ziecik A.J., España F., Garcia Casado P., 1993. Effect of electrical stress stimuli on luteinizing hormone, prolactin and cortisol secretion in pigs. *Investigación agraria. Producción y Sanidad Animales*, 8, 269-280.

Liste des publications

Publications dans des revues à comité de lecture

- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Gallouin, F., Roussel, S. (2009). Les courants électriques parasites en élevage. *INRA Productions Animales*, 22(4), 291-302.
- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Oliveira, A., Martin, O., Louyot, T., Deschamps, F., Roussel, S. (*soumis pour publication, en révision*). Determination of a stray voltage threshold in Holstein heifers, influence of predictability and past-experience on behavioural and physiological responses. *Animal Welfare*.
- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Deiss, V., Charles, C., Deveau, L., Deschamps, F., Roussel, S. (*accepté, après modifications mineures*). Effects of stray voltage on the physiology of stress, growth performance and carcass parameters in Romane male lambs. *Small Ruminant Research*.
- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Barrier, A., Charles, C., Ponter, A., Deschamps, F., Roussel, S. (*accepté, après modifications mineures*). Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology and, milk production and composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*.
- Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Carrière, M., Charles, C., Barrier, A., Deveau, L., Roussel, S. (*en préparation*). Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on behavioral and physiological responses in dairy cows. *Journal of Animal Science*.

Communications affichées publiées dans des proceedings avec comité de lecture

- Rigalma, K., Roussel, S., Barrier, A., Charles, C., Carrière, M., Deveau, L., Deschamps, F., Duvaux-Ponter, C., 2009. Effet à moyen-terme des tensions électriques parasites sur la physiologie du stress chez la vache laitière, *Rencontres Recherches Ruminants*, 16, (254).
- Rigalma, K., Roussel, S., Charles, C., Malherbe, A., Duvaux-Ponter, C., 2009. Does past-experience of a stressor enable sheep to handle more effectively a stressful situation?, 31st International Ethological Conference, Rennes (France), p. 386.
- Cormier, F., Fougeyrolas, J., Beillard, B., Jecko, B., Deschamps, F., Charles, C., Rigalma, K., Roussel, S., Duvaux-Ponter, C., 2008. Système embarqué de mesure des courants traversant les bovins, Journées Scientifiques d'URSI France & 14^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité électromagnétique & Le nouvel environnement électromagnétique, Paris (France) (4 pages).
- Rigalma, K., Roussel, S., Oliveira, A., Louyot, T., Duvaux-Ponter, C., 2007. Détermination du seuil de réaction aux tensions électriques parasites, influence de la prévisibilité et de l'expérience sur les réponses comportementales et physiologiques de génisses Holstein, *Rencontres Recherches Ruminants*, 14, p. 314.
- Roussel, S., Rigalma, K., Oliveira, A., Louyot, T., Duvaux-Ponter, C., 2007. Determination of a stray voltage threshold using behavioural measurements in Holstein heifers, Proceedings of the 41st International Congress of the ISAE, Merida (Mexico), p. 232.

Rigalma, K., Roussel, S., Oliveira, A., Louyot, T., Duvaux-Ponter, C., 2007. Influence of an unpredictable stressor on behavioural and physiological responses of experienced or naïve Holstein heifers, Proceedings of the 41st International Congress of the ISAE, Merida (Mexico), p. 167.

Communications orales sans comité de lecture

Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Gallouin, F., Deschamps, F., Roussel, S., 2010. The effects of stray voltage on ruminants reared under farm conditions, 48th Annual MREC Conference and Agricultural Electric Code Workshop, Lacrosse (WI, USA).

Rigalma, K., Roussel, S., Gallouin, F., Duvaux-Ponter, C., 2009. Effects of stray voltage on behaviour, stress physiology and production parameters of sheep and dairy cows. short and mid-term effects, 47th Annual MREC Conference and Agricultural Electric Code Workshop, Bloomington (MN, USA).

Rigalma, K., Roussel, S., Gallouin, F., Duvaux-Ponter, C., 2007. Effets des courants électriques parasites sur le comportement, la physiologie du stress et les performances zootechniques des animaux d'élevage. Effets à court et moyen termes, Courants parasites dans notre environnement, Limoges (France).

Annexes

1. Différences entre les systèmes de distribution nord-américain et français de l'électricité

Le Schéma de Liaison à la Terre (SLT), anciennement appelé Régime de Neutre, définit le mode de raccordement à la terre du point neutre d'un transformateur de distribution et des masses du côté utilisateur.

Les schémas de liaison à la terre ont pour but de protéger les personnes et le matériel en maîtrisant les défauts d'isolement. En effet, pour des raisons de sécurité, toute partie conductrice d'une installation est isolée par rapport aux masses. Cet isolement peut se faire par éloignement, ou par l'utilisation de matériaux isolants. Mais avec le temps, l'isolation peut se détériorer (à cause des vibrations, des chocs mécaniques, de la poussière,...) et peut donc mettre une masse (la carcasse métallique d'une machine par exemple) sous un potentiel dangereux. Ce défaut présente des risques pour les personnes, les biens mais aussi pour le bon fonctionnement du réseau de distribution.

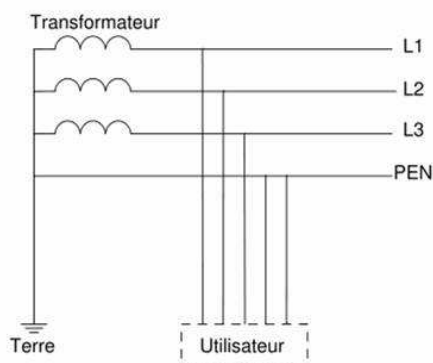
Selon la norme CEI 60364, un schéma de liaison à la terre se caractérise par deux lettres. La première indique le raccordement du neutre du transformateur, elle peut être :

- T pour raccordé à la terre
- I pour impédant (isolé) par rapport à la terre.

La seconde lettre indique la façon de connecter les masses utilisateurs, elle peut être :

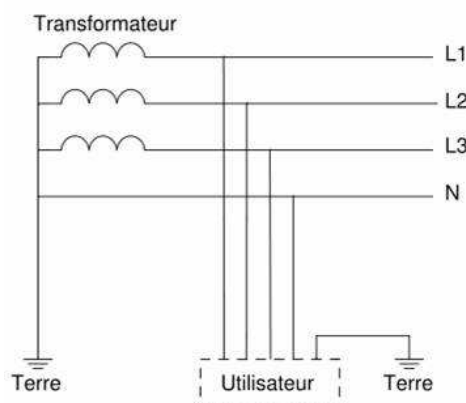
- T pour raccordées à la terre
- N pour raccordées au neutre, lequel est raccordé à la terre

Aux Etats-Unis, le régime est TN-C (la troisième lettre C indiquant que la terre et le neutre sont confondus) :



PEN signifie que le protecteur équipotentiel (PE) et conducteur neutre (N) sont confondus.

En France, le régime adopté est TT :



2. Effects of repeated exposure to stray voltage on the behaviour and the stress physiology in Romane ewe lambs

*Effets des tensions électriques parasites à moyen terme sur le comportement et la physiologie du stress d'agnelles de race Romane
(en préparation)*

2.1 Introduction

On farm, several electrically powered machines are used. Leakage of current from this type of equipments (milking machines, automatic feed dispenser, antifreeze water bowl...), electric and magnetic induction, faulty connections between the electrical circuit and the earth can lead to the undesirable electrical phenomenon called stray voltage (review by Deschamps, 2002). Stray voltage, usually less than 10 V, can produce a low current flowing through farm animals (Norell *et al.*, 1983; Gustafson, 2003). For the last decades, stray voltage has been considered as an important factor contributing to poor performances in dairy farms and in pig production. However almost no scientific data are available on the effects of stray voltage in sheep.

In farms, stray voltage can occur in a random manner and can be unpredictable for the animals (Hultgren, 1990). Predictability of a stimulus or a stressor is important in relation to animal welfare (Désiré *et al.*, 2002; Bassett and Buchanan-Smith, 2007). Indeed, when a stressor occurs in an unpredictable way, it is more stressful for the animal than if the same stressor is predictable (Quirce *et al.*, 1981). However, despite the large number of studies performed on stray voltage in controlled environment, only few studies have integrated unpredictability into their experimental design. While an electric stressor occurring in a predictable way may allow the animal to expect its occurrence and eventually to adapt or to become habituated, the same stressor occurring in an unpredictable way may prevent adaptation or habituation.

Literature on the effects of stray voltage is characterized by discrepancies between experimental results and the reported effects of stray voltage in the field. Indeed, producers and veterinarians have reported impaired production performances as well as increased health problems and behavioural modifications in cows and pigs housed in buildings where stray voltage was detected (review by Hultgren, 1990). In swine production, behavioural problems of aggressiveness, piglet crushing, poor milk production, impaired growth and mortality have been empirically attributed to stray voltage (Wright *et al.*, 1985). However, in controlled environment, none of the experimentations were able to reproduce these effects on production performances (Robert *et al.*, 1991; Godcharles *et al.*, 1993; Robert *et al.*, 1993; Robert *et al.*, 1994). Some behavioural modifications were reported in pigs exposed to an electrical stressor: a decrease in drinking time (Gustafson *et al.*, 1986), an increase in agonistic behaviours (butting conspecifics), a decrease in resting time (Robert *et al.*, 1991; 1992). Numerous studies have succeeded in highlighting an acute physiological stress response to voltage: an increase heart rate in dairy cows (Lefcourt *et al.*, 1985; Lefcourt *et al.*, 1986) or an increase in plasma concentrations of cortisol in dairy cows (Henke Drenkard *et al.*, 1985), in ewe (Przekop *et al.*, 1985) and in pigs (Ziecik *et al.*, 1993). However, no studies investigated the possibility of chronic stress.

The aim of this experiment was to investigate how random or permanent exposure to voltage on the water trough during the growing period affected the growth performance, the drinking behaviour, the time-budget, the emotional reactivity and the stress physiology of ewe lambs. Measurements were conducted to study short term effects (1 week, to identify acute stress responses) and medium term effects (6 weeks, to identify chronic stress responses) of electric exposure.

2.2 Material and Methods

This study was conducted during two consecutive years from May to June, in two identical repetitions. Each repetition included a one-week habituation to the pens and to the procedures (blood sampling, cardiac belt wearing, weighing) and a 6-week experimental period.

2.2.1. Animals, feeding and housing

For each repetition, 45 Romane (INRA 401) ewe lambs, a crossbreed line between Romanov and Berrichon du Cher, progressively weaned from 50 to 70 day-old, were allocated to one of three groups according to age, weight and litter size (averages were respectively, 95 ± 7.5 days, 30.1 ± 3.69 kg, 2.6 ± 0.63 lambs, mean \pm s.d., $n = 90$). The lambs were housed in three similar pens ($3.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, width \times length, 15 lambs of the same treatment in each pen) containing a metallic water trough without enamel coating at the end of a stall ($0.4 \times 1.2 \times 0.8 \text{ m}$, w \times l \times h) (only one lamb could drink at any one time), a trough for concentrate and a straw rack. A fourth pen with non-experimental lambs was used as a buffer pen at the entrance of the building. The pens were straw bedded. A plain wood barrier 1.5 m high separated each pen from the others. Animals were fed twice a day at 09.00h and 17.00h with concentrate (41% barley, 17% corn, 41% rapeseed meal and 1% mineral and vitamins; 0.7 kilogram/lamb/feeding) and straw was available ad libitum. Water and mineral block were available at all time.

During repetition 1, one ewe lamb of the control group was excluded from the experiment due to severe lameness.

2.2.2 Experimental treatments

The water troughs were electrically insulated from all the metallic parts of the pen. An aluminium plate ($0.4 \times 1.2 \text{ m}$, w \times l), isolated from the ground, was placed on the floor of the stall. EDF R&D (Electricité de France Research & Development) provided the electricity exposition system allowing application of the chosen alternating (50 Hz) voltage. A voltage of 3.5V was applied to the water trough to obtain a voltage pathway through the lamb from the muzzle to the 4 hooves (Fig. 1). The voltage level was determined in a preliminary experiment in order to obtain a current intensity through the animal in the same range as the threshold leading to aversion obtained in a previous experiment in lambs (Duvaux-Ponter *et al.*, 2005).

During 6 weeks, lambs were exposed to a voltage of 3.5 V, either permanently (PERM; $n = 30$; 15 animals per repetition), or randomly 34h a week with duration of exposition varying from 4 hours up to 16 hours (RAND; $n = 30$; 15 animals per repetition). Thirty lambs (15 animals per repetition)

were used as control and were not exposed to voltage (CONT). Pens were randomly allocated to the treatments for each repetition.

2.2.3 Production measurements

The animals were weighed once a week to determine their average daily gain. The quantity of water drunk (called water intake thereafter) was recorded twice a day at 0900 h and 1700 h for each pen each day of the first, the third and the fifth week of the experiment, called W1, W3 and W5 respectively thereafter.

2.2.4 Behaviour measurements

Drinking behaviour. Three digital cameras connected to three time-lapse video VCRs were placed above the water troughs to record continuously the lamb's behaviour in the watering stall. All video files were encoded and analyzed using The Observer® Software System for Behavioural Research (Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands). In week 1 (W1), week 3 (W3) and week 5 (W5), drinking behaviour of each individual ewe lamb was measured 4 days a week, 24-h each day. Only the visits into the watering stall with at least one drinking bout were kept for the analysis of drinking behaviour. For each lamb, the data of drinking behaviour were averaged in order to obtain one value per ewe lamb per day of observation. The number of visits per day, the number of visits with at least one sudden movement (a sudden raise up of the head, head-shaking or a sudden backward movement while drinking), the latency to drink after entering the stall (seconds) and the time spent drinking, or sniffing the trough during the visit were recorded. Moreover the postures of the ears were recorded as defined by Désiré (2004): proportion of asymmetric ears, forward ears, backward ears and the number of ear posture changes.

Time-budget. Three digital cameras connected to a time-lapse video VCR and linked to a quad splitter allowing cyclic sequences were fitted above each pen. This allowed alternate recording from each camera during 1 min every 4 min (the 24-h time-budget for the three treatments was recorded on a single video-tape). The choice was made not to install additional lighting to avoid disturbing the nycthemeral rhythm of activity of ewe lambs. Thus the activities were recorded, 4 days a week, in W1, W3 and W5, 9 hours per day from 0700 h to 1200 h (morning) and from 1800 h to 2100 h (evening) when the ewe lambs were the least disturbed by environmental factors such as human activities in the farm or the experimental procedures. The activities were analysed by scan sampling of 5 s every 4 min using The Observer® Software System for Behavioural Research (Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands) and according to a method proposed by Mitlöhner *et al.* (2001). The calculated variables were the percentage of lambs per pen eating concentrate or straw, drinking, lying, walking, sleeping and the frequency of allogrooming or agonistic interactions (butting a conspecific). The pen was divided into three areas according to the distance to the watering stall (in the watering stall, from 0 to 2m and further than 2 m) and the number of ewe lambs in each area was counted.

Novel arena and novel object tests. The novel arena test was performed in a $4 \times 4 \times 1.7$ m arena (w \times l \times h) the first and the sixth week of the experiment. A starting cage measuring 0.6×1.2 m (w

× 1) provided access to the arena. Each ewe lamb was carried, gently placed in the starting cage and released 15 sec later into the arena using a sliding gate. The test lasted 3 min once the ewe lamb entered the arena. The time spent walking, sniffing the environment, the number of attempts to escape, the latency to enter the arena, the number of vocalisations, the latency to the first vocalisation and urination were recorded during the test. Immediately after the end of the novel arena test, the lamb was placed in the starting cage for the novel object test. After 15 sec the lamb was released into the same arena containing a red road hazard cone (0.3×0.5 m, w × h) placed on the floor, 0.7 m to the wall opposite to the entrance. The same behavioural measurements as those recorded in the novel arena test were recorded. Additional measurements were the latency to the first interaction with the novel object, the number of interactions and the time spent close to the novel object (< 1m). The tests were performed alternately on one lamb from each treatment.

2.2.5 Stress physiology measurements

Heart rate. Heart rate measurements were performed in W3 and in week 4 (W4) of voltage exposure, four days a week with three animals per treatment recorded each day from 0800 h to 1800 h (n = 12 lambs per treatment per repetition). The heart rate monitor consisted of a watch receiver (Polar® S610i, Polar Electro, Oy, Finland) and two electrodes (Horse Trainer transmitter Polar®, Fleurier, Switzerland) fitted on an elastic belt adjusted to the thorax size of the lambs. The contact between electrodes and skin was improved by small amounts of ultrasound gel smeared on the chest. The heart rate monitor works by averaging the R-R intervals of the QRS electrocardiogram wave complex over 5-s periods as detailed by (Karnoven *et al.*, 1984). This procedure was used previously in cows by Hopster and Blokhuis (1994) and in lambs by Roussel *et al.* (2004). After completion of data collection, the equipment was removed and the Polar® S610i was downloaded by IR communication via a Polar® Interface onto a computer via the software Polar Equine version 4.0 (Polar Electro, Oy, Finland). Drinking behaviour recordings were used to relate the presence of a lamb in the watering stall to its heart rate measurements. Thus, mean heart rate in the watering stall and mean heart rate during the day were calculated.

Due to loss of signal and chewing of cables, only part of the heart rate data files could be used. When a ewe lamb made several visits to the watering stall on the same day, data were averaged.

Plasma cortisol. Blood samples were collected in W1 and in week 6 (W6) in order to obtain basal plasma cortisol concentrations at the beginning and at the end of the experiment. At least 1 hour before the beginning of sampling, each pen was sub-divided in 2 small pens, with half of the animals in each, in order to facilitate blood sampling procedure. The animals were habituated to this procedure during the week of habituation. Two blood samples were collected by jugular venipuncture at 1430h and 1530h and within 2 minutes of the experimenter handling the animal. This interval is likely to be insufficient for plasma cortisol concentration to have been affected by the handling associated with blood collection (Broom and Johnson, 1993). Moreover, Parrot *et al.* (1994) have shown in sheep that cortisol concentration returned to basal level in less than 30 minutes after handling. Basal cortisol concentrations for each week were calculated using the average of the two blood samples.

ACTH challenge. The adrenocorticotrophic hormone (ACTH) challenge was done in W6 to assess the activity of the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis (Mormède *et al.*, 2007). At least 1 hour before the beginning of sampling, each pen was sub-divided in 2 small pens, with half of the animals in each, in order to facilitate blood sampling procedure. At 1300 h a blood sample for basal level was taken and followed by a single intravenous injection of ACTH (Synacthene®, Novartis-Pharma, Rueil-Malmaison, France) in the jugular vein. ACTH was given at a dose of 0.40 IU/kg BW. Blood samples were collected 30, 60, 90 and 180 min after the injection to measure cortisol responses.

In addition to the maximal plasma cortisol concentration, the integrated response to exogenous ACTH was determined by calculating the area under the curve (C) using the following formula (Boissy *et al.*, 2007): $C = \sum (C_t + C_{t+1})/2 * dt$; where C_t is the concentration at the time t and dt is the time in minutes between samples taken at t and $t+1$.

Cortisol analysis. Blood samples were centrifuged at 3000 g for 10 minutes at 4°C. Plasma was stored at -20°C until analysis. Basal levels of total cortisol were measured by ELISA using an automated method (Elecsys, Roche Diagnostics, Meylan, France). The sensitivity of the cortisol assay was 0.36 ng.mL⁻¹. The inter-assay coefficient of variation was 4.5% at 124.69 ng.mL⁻¹.

2.2.6 Statistical analysis

Statistical analyses were performed using the Statistical Analysis System software (SAS®, version 9.1.3). The MIXED procedure with comparison of the estimates (t-test based) was used with the following general model A: $Y_{ijk} = \mu + T_j + R_k + T_j * R_k + BW_{0i} + e_{ijk}$; where μ represents the overall mean; T_j the fixed effect of the treatment with 3 modalities (CONT, PERM and RAND); R_k the fixed effect of the repetition with 2 modalities (repetitions 1 and 2); $T_j * R_k$ the interaction between the treatment j and the repetition k ; BW_{0i} the body weight of the animal i on the week of habituation as a covariate and e_{ijk} the residual error. This model was used for basal cortisol concentration, ACTH challenge, heart rate and novel arena and novel object test data. For drinking behaviour measurements, the model A was completed with D_x the fixed effect of the day x and r_i the random effect of the animal i . For time-budget, the model A was completed with D_x the fixed effect of the day x and r_z the random effect of the pen z .

Concerning production data (water intake and body weight), the model A was completed with W_l the fixed effect of the week l ; $T_j * W_l$ the interaction between the treatment j and the week l ; and r_i the random effect of the animal i .

When assumptions of homogeneity of variance and normal distribution of the residuals were not verified, a log or square root transformation was performed before carrying out the analysis. Qualitative data were analysed with a Chi-square test. All data are presented as least square means (LSMeans) \pm standard errors (SE) except when otherwise stated.

Results

Data are under analysis.

References

- Bassett, L., Buchanan-Smith, H.M., 2007. Effects of predictability on the welfare of captive animals. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 102, 223-245.
- Boissy, A., Arnould, C., Chaillou, E., Colson, V., Desire, L., Duvaux-Ponter, C., Greiveldinger, L., Leterrier, C., Richard, S., Roussel, S., Saint-Dizier, H., Meunier-Salaün, M.C., Valance, D., 2007. Emotion and cognition: a new strategy to achieve animal welfare. *INRA Prod. Anim.* 20, 17-21.
- Broom, D.M., Johnson, K.G., 1993. *Stress and Animal Welfare*. Chapman & Hall, London (United-Kingdom).
- Deschamps, F., 2002. L'électricité dans l'environnement et les exploitations agricoles. *Bull. Soc. Vet. Prat. France* 86, 174-181.
- Désiré, L., 2004. Etude des processus cognitifs impliqués dans la différenciation des émotions chez l'agneau (*Ovis aries*), Université de Clermont-Ferrand 2, Aubière (France), p. 197
- Désiré, L., Boissy, A., Veissier, I., 2002. Emotions in farm animals: a new approach to animal welfare in applied ethology. *Behav. Proc.* 60, 165-180.
- Duvaux-Ponter, C., Roussel, S., Deschamps, F., 2005. Determination of a stray voltage threshold leading to aversion in sheep, In: Kusunose, R., Sato, S. (Eds.), *Proceedings of the 39th International Congress of the International Society for Applied Ethology*, Sagamihara (Japan), p. 130.
- Godcharles, L., Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1993. Transient stray voltage: Is it detrimental to growth performance, health status and welfare of market pigs? *Vet. Res. Commun.* 17, 41-53.
- Gustafson, R.J., 2003. Stray voltage overview, Stray voltage and dairy farms, NRAES, Radisson Pen Harris Hotel and Convention Center Camp Hill, Pennsylvania, pp. 3-11.
- Gustafson, R.J., Appleman, R.D., Brennan, T.M., 1986. Electrical current sensitivity of growing/finishing swine for drinking. *Trans. ASAE* 29, 592-596,600.
- Henke Drenkard, D.V., Gorewit, R.C., Scott, N.R., Sagi, R., 1985. Milk production, health, behavior, and endocrine responses of cows exposed to electrical current during milking. *J. Dairy Sci.* 68, 2694-2702.
- Hopster, H., Blokhuis, H.J., 1994. Validation of a heart-rate monitor for measuring a stress response in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 74, 465-474.
- Hultgren, J., 1990. Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Vet. Res. Commun.* 14, 287-298.
- Karnoven, J., Chwalbinka-Moneta, J., Saynajakangas, S., 1984. Comparison of heart rate measured by ECG and microcomputer. *Physician Sportmed* 12, 65-69.

- Lefcourt, A.M., Akers, R.M., Miller, R.H., Weinland, B., 1985. Effects of intermittent electrical shock on responses related to milk ejection. *J. Dairy Sci.* 68, 391-401.
- Lefcourt, A.M., Kahl, S., Akers, R.M., 1986. Correlation of indices of stress with intensity of electrical shock for cows. *J. Dairy Sci.* 69, 833-842.
- Mitlohner, F.M., Morrow-Tesch, J.L., Wilson, S.C., Dailey, J.W., McGlone, J.J., 2001. Behavioral sampling techniques for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 79, 1189-1193.
- Mormède, P., Andanson, S., Auperin, B., Beerda, B., Guemene, D., Malmkvist, J., Manteca, X., Manteuffel, G., Prunet, P., van Reenen, C.G., Richard, S., Veissier, I., 2007. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol. Behav.* 92, 317-339.
- Norell, R.J., Gustafson, R.J., Appleman, R.D., Overmier, J.B., 1983. Behavioural studies of dairy cattle sensitivity to electrical currents. *Trans. ASAE* 26, 1506-1511.
- Parrott, R.F., Misson, B.H., De la Riva, C.F., 1994. Differential stressor effects on the concentration of cortisol, prolactin and catecholamines in the blood of sheep. *Res. Vet. Sci.* 56, 234-239.
- Przekop, F., Stupnicka, E., Wolinska-Witort, E., Mateusiak, K., Sadowski, B., Domanski, E., 1985. Changes in circadian rhythm and suppression of the plasma cortisol level after prolonged stress in the sheep. *Acta endocrinol.* 110, 540-545.
- Quirce, C.M., Odio, M., Solano, J.M., 1981. The effects of predictable and unpredictable schedules of physical restraint upon rats. *Life Sci.* 28, 1897-1902.
- Robert, S., Godcharles, L., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1993. Les tensions parasites chez le porc d'engraissement, Journées Recherche Porcine en France, Paris, France, pp. 83-90.
- Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1991. Effects of continuous stray voltage on health, growth and welfare of fattening pigs. *Can. J. Vet. Res.* 55, 371-376.
- Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1992. Stray voltage: its influence on swine production during the fattening period. *Can. J. Anim. Sci.* 72, 467-475.
- Robert, S., Matte, J.J., Bertin-Mahieux, J., Martineau, G.P., 1994. Stray voltage: effects of voltage frequency, floor materials and wetness on electric currents through swine. *Can. Agr. Eng.* 36, 37-43.
- Roussel, S., Hemsworth, P.H., Boissy, A., Duvaux-Ponter, C., 2004. Effects of repeated stress during pregnancy in ewes on the behavioural and physiological responses to stressful events and birth weight of their offspring. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 85, 259-276.
- Wright, R.E., Ackerman, C.W., Spray, R.A., 1985. Stray electricity in swine units. *Animal Health Nutrition* November, 18-20.
- Ziecik, A.J., España, F., Garcia Casado, P., 1993. Effect of electrical stress stimuli on luteinizing hormone, prolactin and cortisol secretion in pigs. *Investig. agrar., Prod. sanid. anim.* 8, 269-280.

3. Animaux expérimentaux

Les animaux utilisés lors de cette thèse étaient issus des troupeaux de la Ferme expérimentale d'AgroParisTech située à Grignon (78).

Le troupeau ovin de la Ferme expérimentale est destiné à la production d'agneaux de boucherie et de reproducteurs (vente de béliers et d'agnelles). Le cheptel est composé de deux races : Berrichon du Cher (120 brebis) et Romane (ex INRA 401, 330 brebis). La conduite alimentaire des brebis est basée sur la valorisation du couvert végétal (de mai à septembre) et l'utilisation en hiver d'une ration semi-complète composée de pulpe de betterave, paille, foin, écorces d'orange, tourteau de colza gras, luzerne déshydratée et orge. La reproduction du cheptel ovin est en partie dessaisonnée, les agnelles n'étant pas mises à la reproduction en même temps que les adultes, ce qui permet d'obtenir des agneaux à une période où le prix de vente est plus intéressant. Les agnelles de race Romane utilisées lors de la thèse sont issues de la période d'agnelage de février alors que les agneaux de race Romane sont issus de la période d'agnelage de septembre. Le gain moyen quotidien (GMQ) des agneaux mâles de race Romane entre le sevrage et l'abattage (entre 70 et 120 jours environ) est en moyenne de 280-300 g/jour. Les agneaux de boucherie (115-120 jours) ont un poids vif d'abattage variant entre 38 et 44 kg. Selon la grille EUROP de classification des carcasses {European Union, 1993 #369}, la conformation des carcasses d'agneaux de race Romane issus de la Ferme est « R » pour 75% des carcasses et 25% sont classées « O ».

Le troupeau laitier est composé de 112 vaches laitières de race Prim'Holstein produisant 1 044 000 litres de lait dont 166 000 transformés sur l'exploitation (chiffres 2008). Le troupeau laitier est conduit de façon intensive, les animaux en production vivant à l'étable (aire paillée ou logettes avec caillebotis intégral) toute l'année. Le niveau de production des animaux est élevé avec en moyenne près de 10 000 kg de lait par lactation. Les performances laitières du troupeau de la ferme expérimentale sont données dans le tableau A.

Tableau A. Extrait du bilan fourni par le contrôle laitier. Comparaison des résultats de la campagne 2008 de la Ferme expérimentale de Grignon avec ceux de la région Ile de France.

	Ferme de Grignon	région Ile de France
lait / vache présente	9 796 kg	8 539 kg
taux protéique	32,2 g/l	32,0 g/l
taux butyreux	35,7 g/l	37,9 g/l
taux cellulaire moyen	216 000	318 000
% de vaches < 300 000 cellules	86%	75%
% de vaches > 800 000 cellules	4%	8%
taux de guérison des mammites au tarissement	75%	65%
taux de nouvelles infections	19%	19%

La ferme est équipée d'un outil de gestion électronique du troupeau ALPRO[®] (DeLaval snc., Les Clayes sous Bois, France) permettant notamment l'enregistrement quotidien de la production laitière individuelle grâce à des compteurs à lait (MM15, DeLaval snc., Les Clayes sous Bois, France) et la détection des chaleurs grâce à des colliers détecteurs d'activité (DeLaval snc., Les Clayes sous Bois, France). La ration complète distribuée aux vaches en production est composée d'ensilage de maïs, de drèches de brasserie, de pulpe de betterave, de maïs grain humide, de tourteau de colza gras, de foin de luzerne et de minéraux. Les principales informations relatives à la gestion technico-économique du troupeau laitier sont présentées dans le tableau B.

Tableau B. Comparaison des résultats de la reproduction de la campagne 2007 de la Ferme expérimentale de Grignon avec ceux de la région Ile de France.

	Résultats Ferme Grignon	résultats région Ile de France
intervalle vêlage-vêlage	431 jours	405 jours
intervalle vêlage-1 ^{ère} IA	77 jours	
intervalle vêlage-fécondation	113 jours	
intervalle vêlage-fécondation > 110 jours	55 %	44 %
fertilité (nombre d'IA/IAF)	2,4	2,3
fertilité des génisses (IA/IAF)	1,4	
taux de conception en 1 ^{ère} IA	29 %	46 %
durée de lactation	370 jours	342 jours
taux de renouvellement annuel	44 %	35,5 %
vaches inséminées 3 fois et plus	38 %	27,5 %
âge au 1 ^{er} vêlage	27 mois	29,8 mois

4. Dispositifs expérimentaux

Cette thèse a nécessité la création de nouveaux dispositifs expérimentaux spécifiques à chaque expérimentation. Tous les dispositifs expérimentaux ont été réfléchis avec des professionnels de la contention et de la manipulation des bovins et ovins (Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort) ainsi qu'avec les responsables des troupeaux de la ferme d'AgroParisTech.

Pour les expérimentations à moyen terme chez les ovins, des installations ont été mises en place afin de pouvoir héberger 45 jeunes ovins dans trois enclos de 3,5×4 mètres (soit 15 animaux par enclos). Chaque enclos était équipé d'une stalle d'abreuvement individuelle (Figures 1 et 2).



Figure 1. Enclos d'élevage utilisé pour les expérimentations à moyen terme chez les ovins.



Figure 2. Stalle d'abreuvement utilisée lors des expérimentations à moyen terme chez les ovins.

Pour les expérimentations chez les bovins, les dispositifs expérimentaux ont été conçus pour pouvoir accueillir et manipuler en toute sécurité des animaux pesant de 150 kg pour les génisses à plus de 700 kg pour les vaches. L'expérimentation à court terme sur les génisses a nécessité la création d'une plate-forme bétonnée de 85 m² afin d'installer le dispositif de test individuel (Figures 3 et 4). Cette plate-forme était composée d'un enclos d'attente, d'une case de départ, d'un couloir de test et d'un enclos de sortie équipé de cornadis.

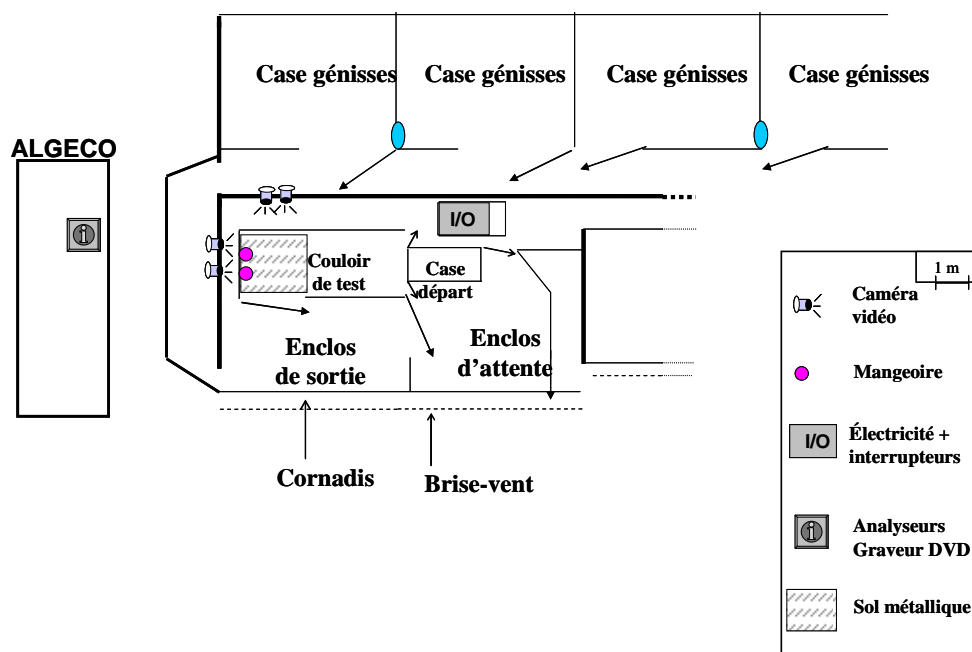


Figure 3. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la détermination du seuil de réaction à court terme aux tensions électriques chez la génisse.



Figure 4. Enclos de test utilisé pour la détermination du seuil de réaction à court terme aux tensions électriques chez la génisse (phase d'habituatation).

L'expérimentation à moyen terme chez la vache laitière a nécessité la création d'une plate-forme bétonnée de 90 m² afin de recevoir les six stalles d'abreuvement individuelles. Le dispositif expérimental a été basé sur l'emploi d'abreuvoirs individuels avec un accès contrôlé par un portillon pourvu d'une fermeture électromagnétique activée par une clef électronique (transpondeur) située autour du cou de chaque vache. L'identification de chaque animal a été réalisée au moyen d'antennes situées dans chaque portillon. Chaque stalle était pourvue de séparateurs pour éviter l'accès latéral aux abreuvoirs des animaux non autorisés et pour éviter un éventuel transfert d'électricité entre les individus (Figures 5 et 6).



Figure 5. Plate-forme d'abreuvement utilisée lors de l'étude des effets à moyen terme d'une tension électrique appliquée sur l'abreuvoir chez la vache laitière.



Figure 6. Ouverture du portillon électronique par une vache autorisée à accéder à l'abreuvoir.

Les dalles de béton ont été créées de sorte à assurer la continuité électrique (équipotentialité) des fers à béton et des masses métalliques de l'élevage (fourreaux, poteaux, barrières...) ce qui a permis l'évacuation à la terre d'éventuelles tensions électriques parasites. En effet, les panneaux de treillis soudés², qui servent classiquement d'armature pour les dalles de béton, ont été soudés entre eux et reliés à une prise de terre unique (boucle en fond de fouille composée d'un câble de cuivre relié à un piquet de terre) dont l'efficacité a été vérifiée (de l'ordre de l'ohm).

Un système d'enregistrement vidéo composé de plusieurs caméras a été placé au dessus des dispositifs expérimentaux et des enregistreurs ont été placés dans un local technique. Chaque dispositif a également été équipé d'un système électrique permettant l'application d'une tension électrique sur les mangeoires (expérimentation à court terme chez les génisses) et sur les abreuvoirs (expérimentations à moyen terme chez les ovins ou les vaches laitières). Ces systèmes ont été développés par EDF R&D (Electricité de France Recherche & Développement) et installés par des électriciens qualifiés. Tous ces systèmes électriques ont été vérifiés et certifiés par un organisme certificateur indépendant (APAVE ou Norisko) et répondent à la norme NF C 15-100 qui fixe la réglementation des installations électriques en France (AFNOR, 1956). Par ailleurs, un diagnostic de la ferme expérimentale a été réalisé par EDF R&D avant les expérimentations afin de vérifier l'absence de tensions électriques parasites au niveau des installations expérimentales et d'élevage.

² Les treillis soudés sont des armatures prêtes à l'emploi, formées de fils tréfilés assemblés rigidement en mailles carrées ou rectangulaires par soudure électrique. Les treillis soudés sont fabriqués en panneaux et servent notamment, dans le bâtiment et les travaux publics, à la construction de dalles de béton, murs porteurs, escaliers, panneaux préfabriqués en béton...

5. Does past-experience of a stressor enable sheep to handle more effectively a stressful situation?

Proceedings of the XXI International Ethological Conference - Rennes 2009

Does past-experience of a stressor enable sheep to handle more effectively a stressful situation?

Karim Rigalma, Sabine Roussel, Cyril Charles, Aude Malherbe & Christine Duvaux-Ponter
 AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France
 (rigalma@agroparistech.fr, roussel@agroparistech.fr, duvaux@agroparistech.fr)

Past-experience could influence cognitive processes by modifying attention, memory and judgement. Ewe lambs were exposed in their pen to a mild stressor (electricity, 3.5V applied to the water trough placed in a stall) either permanently (PERM, n=15), randomly (34h/week, RAND, n=15) or to no stressor (CONT, n=15). After a 7-week exposure, lambs were individually tested in 3-min motivation trials during four days.

The positive reinforcement was a bucket containing either concentrate (C) or water (W). The reinforcement was placed either in a replica of the stall for C+ and W+ trials or on the floor for C and W trials. Latency to reach the bucket, reinforcement intake (either feed or water), number of vocalizations and mean heart rate were recorded. Data were analysed with PROC MIXED of SAS[®] with treatment, day and trial as fixed effects and a repeated effect of the individual.

Regardless of the trial, RAND lambs were faster to reach the bucket ($P<0.05$) and had a greater intake ($P<0.05$) than CONT lambs; PERM lambs were intermediate. RAND lambs vocalized less in C and C+ trials than CONT lambs ($P<0.05$). Mean heart rate was similar between treatments ($P>0.10$). Lambs with past-experience of a mild stressor seem to better handle a challenging and mildly stressful situation.



Does past-experience of a stressor enable sheep to handle more effectively a stressful situation?



Rigalma K., Roussel S., Charles C., Malherbe A., Duvaux-Ponter C.
AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris

Introduction

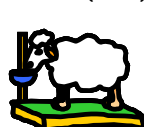
Past-experience (stressful experience) could influence emotional reactivity of animals and their reaction to the environment

Objectives

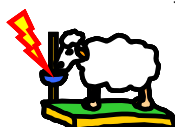
Appreciate the effects of a mild chronic stress on the feeding and drinking motivation of lambs in an unusual situation

Materials and methods

Rearing conditions: 7-week exposure in the rearing pen to a mild electric stressor (3.5 V) applied to the water trough in a stall



CONT $n = 15$
no stressor exposure



PERM $n = 15$
permanent exposure to stressor

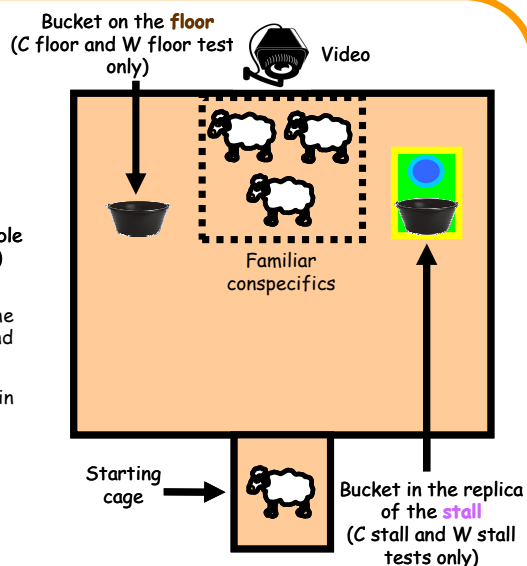


RAND $n = 15$
random and unpredictable exposure (34h/week) to stressor

Habituation procedure: ewe lambs habituated for 4 days to the experimental bucket containing the reinforcement in their rearing pen and to the experimental arena (without bucket)

Test procedure: lambs individually tested in 4 motivation tests (3-min duration) during 4 consecutive days with a Latin-square design

Tests	Reinforcement	Localisation
C floor	Concentrate	On the floor
C stall	Concentrate	In the replica of the stall
W floor	Water	On the floor
W stall	Water	In the replica of the stall

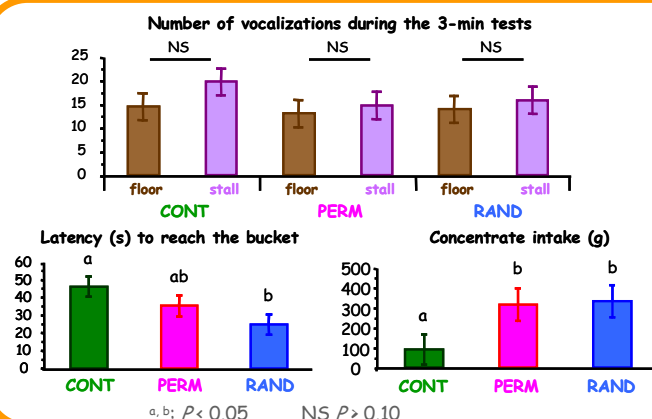


Test apparatus

Measurements: Latency (s) to reach the bucket, feed and water intake (g) during the test and number of vocalizations

Data was analysed with the MIXED procedure of SAS®

Results and discussion



▪ No interaction between the treatment and the presence of the stall on the number of vocalizations and the latency to reach the bucket

⇒ The stall in which PERM and RAND lambs were exposed to the stressor during rearing does not seem to be perceived as negative during the challenging situation

▪ RAND lambs were faster to reach the bucket. PERM and RAND lambs had a greater intake of reinforcement compared to CONT lambs

⇒ RAND lambs could be more motivated to eat or drink in the unusual situation than CONT lambs since no difference in water or feed intake was observed during the rearing period

Conclusion

Lambs with experience of a mild unpredictable stressor seem to better handle a challenging and unusual situation. Indeed, it could be possible that experience of a mild stress during rearing subsequently facilitates adaptation to a new challenging situation

31st International Ethological Conference - 19th-24th August 2009 Rennes, France.

6. Système embarqué de mesures de courant traversant les bovins



COMITE NATIONAL
FRANÇAIS DE
RADIOELECTRICITE
SCIENTIFIQUE

SYSTEME EMBARQUE DE MESURE DES COURANTS TRAVERSANT LES BOVINS

Florian CORMIER – Julien FOUGEYROLAS

CISTEME ; ESTER Technopole, B.P. 6913, 87069 Limoges cedex

Bruno BEILLARD – Bernard JECKO

XLIM UMR CNRS n°6172, Un

bruni.beillard@unilim.fr

François DESCHAMPS

RTE CNER ; Cedex 48 - 92068 Paris la défense

Cyril CHARLES, Karim RIGALMA,

Sabine ROUSSEL, Christine DUVAUX-PONTER

AgroParisTech ; Avenue Lucien Brétignières F-78850 Thiverval Grignon

Résumé. Dans leurs environnements naturels les bovins peuvent être soumis à des phénomènes électriques parasites. Leurs sources sont nombreuses telles que des défauts d'installations électriques, des clôtures électriques, des réseaux électriques ... Au-delà de certains seuils, ils pourraient affecter le comportement animal et engendrer des baisses de production, en particulier pour les vaches laitières [1].

Notre projet consiste à mesurer les niveaux d'intensité des courants circulant dans les animaux. Pour cela, nous avons mis au point un système autonome sur des bovins capable de relever en temps réel la valeur de courant les traversant et de transmettre cette information à distance au moyen d'un système radio fréquence. Ce dispositif, couplé à un module de localisation, devrait permettre de détecter et de localiser d'éventuelles zones à problème dans une exploitation agricole.

Ce papier présente la mise en œuvre du système autonome embarqué pour la mesure des courants traversant les bovins. Il a été développé au travers d'une collaboration d'étude entre CISTEME et RTE. Les mesures ont été effectuées sur la ferme d'AgroParisTech située à Grignon.

I. DEFINITION

I.1 Tension de contact

Une tension de contact est une différence de potentiel entre un élément métallique dans une exploitation et le sol. Soumis à cette tension les animaux sont traversés par un courant que nous cherchons à mesurer (cf. fig.1).

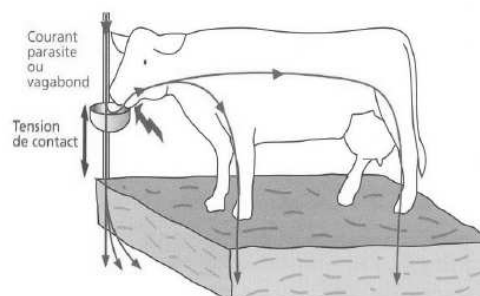


Fig. 1 – Tension de contact [2]

I.2 Tension de pas

Une tension de pas est une différence de potentiel entre les membres d'un animal, généralement entre les membres antérieurs et les membres postérieurs. Cette tension est induite par des courants vagabonds se propageant dans le sol. Il a été observé qu'elle peut-être plus élevée lors de changement de milieu (passage d'un sol bétonné à un sol argileux...) (cf. fig.2).

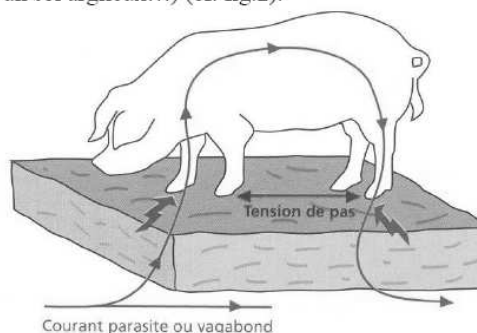


Fig. 2 – Tension de pas [2]



COMITE NATIONAL
FRANÇAIS DE
RADIOELECTRICITE
SCIENTIFIQUE

I.3 Seuil de sensibilité des vaches laitières

Selon les données bibliographiques disponibles, les vaches laitières peuvent être perturbées par des courants de l'ordre de 4 mA [3], plusieurs conséquences peuvent être observées : diminution de la production et/ou de la qualité du lait, augmentation de la durée de traite, augmentation des mammites, modifications comportementales ...

II. PRESENTATION DU SYSTEME

Il a fallu concevoir un système suffisamment résistant pour des animaux de plus de 600 kg en moyenne. Compte tenu de ces contraintes, nous avons imaginé un dispositif de mesure adapté à cet animal. Il se compose d'électrodes placées sur la peau de l'animal. Entre deux électrodes séparées d'une distance comprise entre 10 et 50 cm, apparaît une différence de potentiel proportionnelle au courant traversant l'animal. Cette différence de potentiel est alors acheminée sur l'entrée d'un module émetteur radio fréquence SG link de la société DPS (cf. fig. 3).

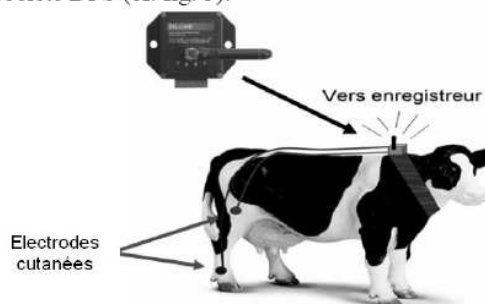


Fig. 3 – Vue d'ensemble du système embarqué et du Module SG-Link – fabricant DPS

Une base réceptrice connectée sur le port USB d'un ordinateur portable est placée à moins de 70 m du bovin.

Une interface graphique associée au dispositif de mesure permet de surveiller à distance et en temps réel le courant traversant l'animal. Deux logiciels ont été développés pour le module SG Link. Le premier, High Speed Stream de Labview, offre une bande passante élevée. Le second, Agil Link de DPS, offre la possibilité d'effectuer deux acquisitions simultanément.

Un développement possible du système serait de le combiner avec un module de localisation d'une précision de quelques dizaines de centimètres également embarqué sur le bovin et permettant ainsi d'associer à la mesure du courant traversant l'animal, sa position exacte dans l'exploitation. Au final, ce dispositif serait d'une aide précieuse pour identifier les zones de l'exploitation agricole où des problèmes d'ordre électrique peuvent être

rencontrés et éventuellement provoquer un stress chez les animaux d'élevage.

III. ETAPE DE CALIBRAGE

Dans un premier temps, le système de mesure du courant traversant l'animal a été calibré. Pour ce faire, nous avons injecté un courant I connu de niveau inférieur à 4 mA et de fréquence inférieure à 500 Hz, puis nous avons relevé la tension obtenue aux bornes des différentes électrodes. Deux électrodes ont été placées sur chaque membre, soit un total de huit électrodes. Ainsi, il est possible de faire correspondre aux mesures de différences de tensions entre les électrodes, le niveau de courant traversant réellement l'animal.

Un générateur basse fréquence injecte un courant variable (4 mA maximum) et de différentes caractéristiques (sinus, triangle, carré, impulsionnel) sur le membre arrière droit (cf. fig 4).

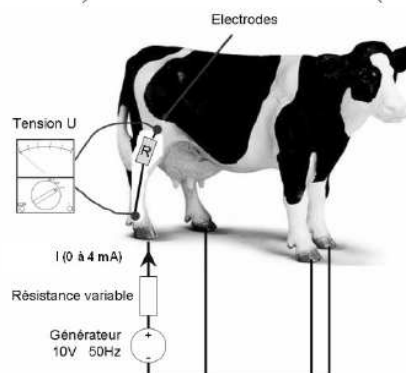


Fig. 4 – Calibrage de l'ensemble

Deux méthodes d'injection ont été mises en place :

- par l'utilisation de bottes

La vache est équipée de 4 bottes en plastique. Celles-ci l'isolent électriquement du sol permettant de réduire les résistances de contact, de s'isoler d'éventuelles sources extérieures et de ne pas générer des perturbations vers l'extérieur pouvant éventuellement stresser d'autres vaches (cf. fig. 5).

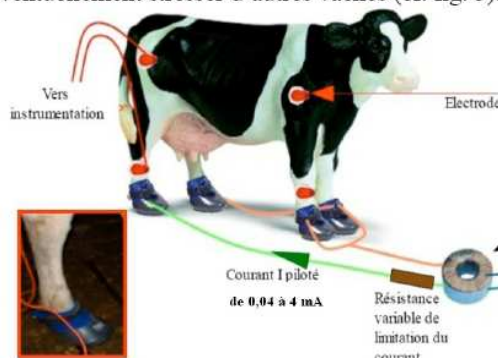


Fig. 5 – Système de calibrage



COMITE NATIONAL
FRANÇAIS DE
RADIOELECTRICITE
SCIENTIFIQUE

Ces bottes servent à injecter le courant sur les pattes de l'animal, via des plaques métalliques placées à l'intérieur. L'injection se fait sur le membre arrière droit, les trois autres étant reliés électriquement à la masse du générateur. De plus, des éponges humides sont insérées dans les bottes entre le sabot et la plaque permettant d'améliorer le contact électrique (cf. fig. 6).

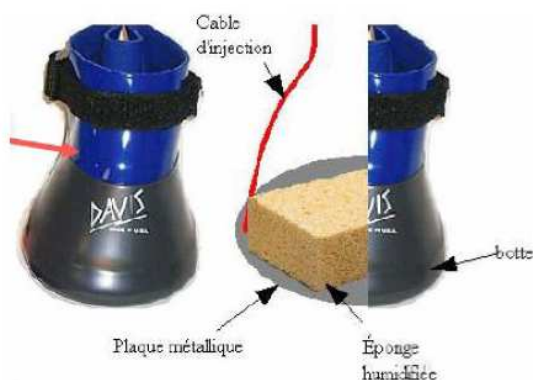


Fig. 6 – Botte d'injection

- par l'utilisation de plaques conductrices sur tapis isolant

Par la suite, dans un but de simplification de manipulation, les bottes ont été retirées. L'injection a été réalisée au moyen de deux plaques positionnées sur un tapis isolant. Les membres antérieurs sont sur une plaque, les membres postérieurs sur l'autre. Dans ce cas, l'injection est réalisée simultanément sur les membres antérieurs le retour se faisant par les membres postérieurs (cf. fig. 7).



Fig. 7 – Tapis isolant et plaques d'excitation

Toutes les mesures ont été réalisées avec des électrodes cutanées de type Electrocardiogramme (EF medica ou Polar). Il est important de noter que la différence de potentiel obtenue entre deux électrodes dépend de son emplacement, de la distance les séparant mais également de leur contact avec l'animal. C'est pourquoi, au niveau de l'emplacement des électrodes, les vaches sont rasées. L'ajout d'un gel conducteur (Aquasonic 100 de Parker Laboratories) entre l'électrode et la peau

de l'animal s'avère indispensable pour améliorer le contact électrique. Des bandes scratch viennent maintenir les électrodes et les câbles de mesure (cf. fig 8).



Fig. 8 – Positionnement des électrodes

Le module SG link est inséré dans un boîtier PVC ABS type IP 66 protégeant l'ensemble des chocs, de la poussière et de l'humidité. Les câbles sortent par un presse étoupe pour conserver une parfaite étanchéité. Le boîtier est posé sur un socle en bois avec un revêtement anti-humidité. Deux coussinets sont fixés à ce socle en bois pour que l'ensemble ne blesse pas l'animal. L'ensemble est fixé sur un surfaix de cheval entourant le poitrail de la vache (cf. fig. 9).



Fig. 9 – Système complet

IV. ESSAIS

Différents essais ont été réalisés en collaboration avec AgroParisTech.

Deux vaches ont été gracieusement prêtées par AgroParisTech pour les expérimentations. Elles ont été choisies pour leur comportement particulièrement calme. Les manipulations sur les

bovins ont été effectuées par du personnel qualifié d'AgroParisTech que nous remercions.

Nous avons simulé, par exemple, une tension de contact entre une vache positionnée sur une plaque métallique et un abreuvoir. Une tension a été appliquée sur l'abreuvoir et la répartition du courant sur chacun des quatre membres a été observée (cf. fig. 10).

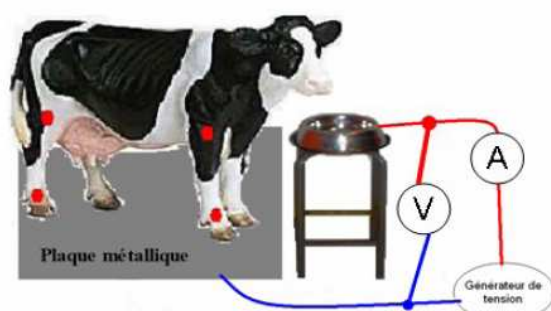


Fig. 10 – Simulation d'une tension de pas

La figure 11 montre la forme du signal obtenu sur le membre arrière droit lorsqu'une vache boit dans un abreuvoir électrisé (tension de 2V, Sinus 50 Hz). Le courant mesuré est au maximum de 80 μ A.

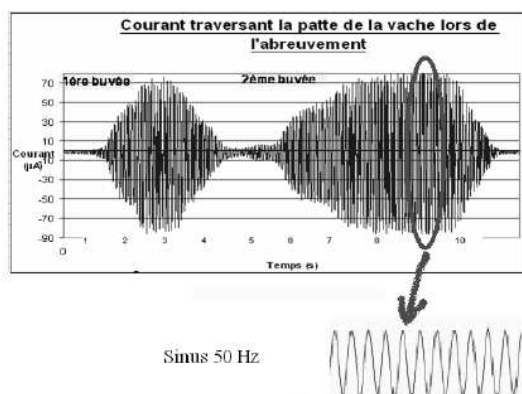


Fig. 11 – Courant dans la patte arrière droite de la vache (simulation d'une tension de contact)

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La faisabilité de la mesure à distance du courant sur le membre d'un animal dans des conditions expérimentales encadrées a été démontrée. Néanmoins, pour une mise en situation opérationnelle en exploitation agricole, de nombreux problèmes restent encore à résoudre.

Le plus important est que les électrodes cutanées EF medica se décrochent trop souvent pour permettre une campagne de mesure de plusieurs

journées. D'autres modèles cutanés comme les électrodes Polar doivent être testées. Il serait également possible d'envisager des électrodes sous-cutanées mais les risques d'arrachement et d'infection nous semblent trop élevés.

Un autre problème provient du module SG-Link qui effectue une mesure actuellement en mode commun limitant fortement les solutions d'immunisation des câbles reliant les électrodes. Une mesure en mode différentiel est possible sur ce module mais n'est pas encore compatible avec nos mesures.

REFERENCES

- [1] Hultgren, J., 1990). Small electric currents affecting farm animals and man: a review with special reference to stray voltage. I. Electric properties of the body and the problem of stray voltage. *Veterinary Research Communications*, **14**, 287-298.
- [2] Plaquette d'information PROMOTELEC, MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE, RTE, GROUPAMA, EDF, ASSEMBLEE PERMANENTE DES CHAMBRES D'AGRICULTURE, "Mieux connaître les risques des courants électriques parasites dans les exploitations d'élevage", juin 2003.
- [3] Publication HYDROQUEBEC, "Behavioral and milk Production Responses to increasing Current Levels", Lefcourt, 1991

7. Determination of a stray voltage threshold using behavioural measurements in Holstein heifers

41st Congress of the International Society for Applied Animal Ethology. Mérida, Mexico 30 July - 3 August 2007.

Abstract

Determination of a stray voltage threshold using behavioural measurements in Holstein heifers

Roussel S., Rigalma K., Oliveira A., Louyot T., Duvaux-Ponter C.

AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris

Réseau de Transport d'Electricité, CNER, 34-40 rue Henri Régnault, 92068 Paris La Défense
CEDEX 48

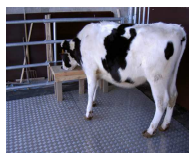
Stray voltage (less than 10V) often caused by a faulty connection between the electrical circuit and the earth can occur in farms and may impair animal welfare. The aim of this experiment was to determine the threshold level at which heifers perceive the electric shock, as well as their behavioural responses using an avoidance test.

Over a 4-week period, forty Holstein heifers (5 to 10 months old) were trained to eat concentrate from two metallic feeders at the end of a 5m long corridor. For 20 heifers (VOLT), a voltage was then applied for 2min to the feeder in which the heifer initially started to eat. This allowed the heifer to change to the non-electrified feeder if it wanted to. The voltage was increased daily in steps of 0.3V from 0V up to 5V. The remaining heifers (CONT) followed the same procedure as the VOLT heifers but without any electricity. The data were analysed by a Khi-square analysis or the MIXED model procedure of SAS[®] with voltage as a fixed effect, the animal as a random effect and taking into account the day effect by using the results obtained with the CONT heifers.

For a voltage $\geq 2.3V$, the percentage of total feed eaten from the electrified feeder and the time spent eating in the electrified feeder decreased ($P < 0.05$). Above 3V, VOLT heifers changed more quickly to the non-electrified feeder ($P < 0.05$). Above 2V, more VOLT heifers performed muzzle-grooming ($P < 0.01$) and head shaking ($P < 0.01$) than CONT heifers.

A voltage of 2.3V appears to be the threshold at which avoidance behaviour starts for a large number of heifers. However, large variations in the responsiveness of animals were observed and further research is necessary to study whether individual electrical resistance may explain some of the variability in the voltage threshold.

Keywords: heifer, stray voltage, threshold, avoidance



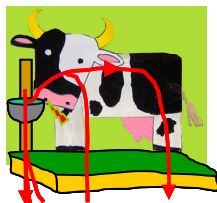
Determination of a stray voltage threshold using behavioural measurements in Holstein heifers

Roussel S.¹, Rigalma K.¹, Oliveira A.¹, Louyot T.², Duvaux-Ponter C.¹

¹AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris

²Réseau de Transport d'Electricité, CNER 34-40 rue Henri Régault, 92068 Paris La Défense

Introduction



Stray voltage (less than 10V) often caused by a faulty connection between the electrical circuit and the earth can occur in farms and may impair animal welfare.

Objective

Determine the **threshold level** at which heifers perceive the **electric shock**, as well as their behavioural responses using an avoidance test

Materials and methods

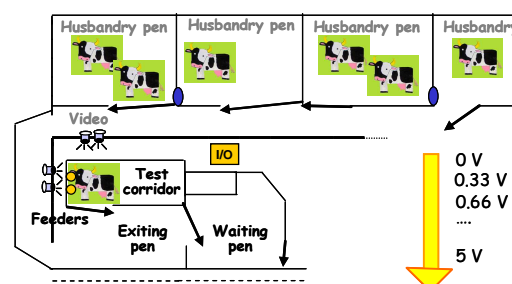
40 heifers (5 to 10 months old)

TRAINING PROCEDURE

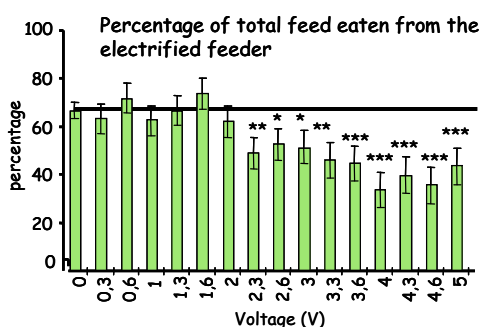
- ⇒ eat concentrate from two metallic feeders at the end of a 5m long corridor during 2 min
- ⇒ 5 days / week during 4 weeks

TEST PROCEDURE

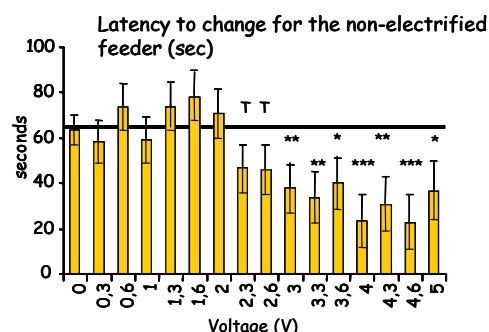
- ⇒ 20 heifers (VOLT) with electricity applied for 2 min to the feeder in which the heifer initially started to eat (possibility to change to the non-electrified feeder if they wanted to)
- ⇒ 20 heifers without electricity
- ⇒ voltage increased daily in steps of 0.33V from 0 V to 5V



Results and discussion



Above 2.3 V, a decrease of the percentage of total feed eaten from the electrified feeder was observed for the VOLT heifers compared to CON heifers

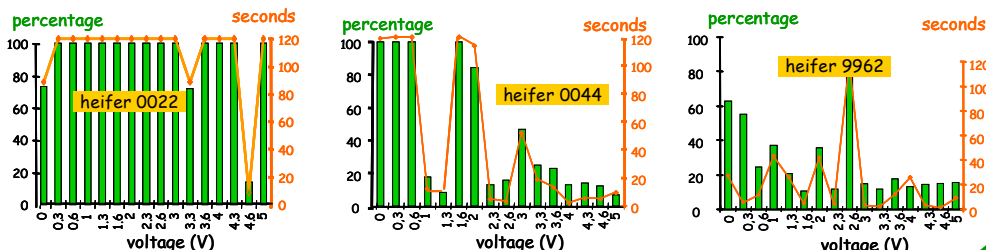


Above 3 V, a smaller latency before changing to the non-electrified feeder for VOLT heifers compared to CON heifers

A threshold statistically around 2.3 V but ... an important individual variation

Percentage of feed eaten from the electrified feeder (columns) and latency before changing to the non-electrified feeder (curve)

- Heifer 0022 : no change of feeder even for high voltages
- Heifer 0044 : a first modification of behaviour at 1V, and a second at 2.3 V
- Heifer 9962 : an irregular feeding behaviour



Conclusion

A voltage of 2.3V appears to be the threshold at which avoidance behaviour starts for a large number of heifers. However, large variations in the responsiveness of animals were observed and further research is necessary to study whether individual electrical resistance may explain some of the variability in the voltage threshold.

41st Congress of the International Society for Applied Ethology - 30 July-3 August 2007 Merida, Mexico.

Abstract

Stray voltage is a low voltage (less than 10 V) which can be measured between two points which simultaneously come into contact with an animal. Stray voltage has two origins: an on-farm origin, due to electrically powdered machines and an off-farm origin due to the electrical surroundings of the farm. Currents created by this voltage can flow through the metallic structure of farm equipment. The subject of stray voltage in farm animals is a topic which generates much interest in the agricultural community because of its potential effects on farm economics.

A multi-criteria experimental approach was used. It consisted of studying, under farm conditions, the short and medium-term effects of permanently or randomly applied voltage on behaviour and, physiological and performance responses in sheep and cattle. Specific emphasis was placed on the consequences of unpredictability of voltage exposure, which has been rarely studied when dealing with stray voltage.

In the short-term, a persistent reaction threshold (lasting change in behaviour) of 2.3 V (2.6 mA) was observed in heifers subjected to voltage applied to a feeder. Past experience of electricity reduced the stress responses of the heifers subsequently exposed to voltage. However, in the short-term, random (unpredictable) voltage exposure did not allow heifers to adapt to the situation compared to heifers submitted to permanent (predictable) voltage exposure. In the medium-term (8 weeks), the exposure of lactating dairy cows to a voltage of 1.8 V (3.6 mA) applied to their water trough in a permanent (predictable) or in a random (unpredictable, 36 hours/week) manner affected neither milk yield nor milk quality (fat and protein content and somatic cell counts) although a transient decrease in milk yield was observed on the 2nd or the 3rd day of exposure. Some behavioural (drinking behaviour) and physiological responses (heart rate) during the first two weeks of exposure demonstrated a transient acute stress response. After eight weeks of exposure, cows permanently exposed became habituated to voltage while cows randomly exposed still showed physiological stress responses and behavioural changes. This could indicate a mild chronic stress due to the unpredictability of voltage exposure.

In the medium-term (6 weeks), repeated exposure to 3.5 V (2.4 mA) applied permanently or randomly to the water trough had no effect on growth and water consumption of growing-finishing lambs. However, fewer fat carcasses, a lower plasma cortisol concentration at slaughter and a higher adrenal medulla weight, suggested that permanent exposure to voltage could induce medium-term changes in the stress physiology of lambs.

In lambs and dairy cows, the challenges designed to investigate emotional reactivity and motivation showed that, in the medium-term, exposure to a mild stressor could favour the subsequent adaptation of the animals to a new challenging situation.

In farms, stray voltage can be considered as a mild stressor with no impairment of production performance but with a transient acute stress response and a possible mild chronic stress response in the case of unpredictable exposure. However, large variability in individual responses was observed in the present experiments.

Keywords: *stray voltage, sheep, dairy cows, stress physiology, behaviour, production, unpredictability*

Résumé

Les tensions électriques parasites sont des tensions de faible niveau (< 10 volts) mesurées entre deux points qu'un animal peut simultanément toucher. Elles ont deux origines, l'une interne, liée aux dispositifs électriques existant en élevage, l'autre externe, imputable aux équipements et réseaux proches de l'exploitation agricole. Les courants électriques créés par ces tensions peuvent circuler dans les structures métalliques de l'élevage. La question des effets des tensions électriques parasites sur les animaux d'élevage est un sujet d'actualité qui intéresse de plus en plus la profession agricole en raison des enjeux économiques qui pourraient en découler.

L'approche expérimentale suivie était multicritère. Elle a consisté à étudier en conditions d'élevage, à court et moyen terme, les réponses comportementales, physiologiques et zootechniques à des tensions électriques appliquées de manière aléatoire ou permanente chez des ovins et des bovins. Une attention particulière a été portée aux conséquences de l'imprévisibilité de l'exposition à la tension électrique, actuellement peu prise en compte dans les études sur les tensions parasites.

A court terme, un seuil de réaction persistante (modification durable du comportement) de 2,3 V (2,6 mA) a été mis en évidence chez des génisses soumises à une tension électrique au niveau d'une mangeoire. Une confrontation antérieure à l'électricité a réduit les réponses de stress des génisses lors d'une nouvelle exposition à la tension. Par contre, une exposition aléatoire (imprévisible) à la tension électrique a rendu plus difficile l'adaptation à court terme des génisses par rapport à une exposition permanente (prévisible). A moyen terme (8 semaines), l'exposition de vaches laitières en lactation à une tension de 1,8 V (3,6 mA) au niveau de leur abreuvoir de manière permanente (prévisible) ou aléatoire (imprévisible, 36 heures par semaine) n'a eu aucun effet sur la quantité de lait produite ni sur sa composition (TB, TP et taux de cellules), hormis une baisse ponctuelle de production laitière le 2^{ème} ou le 3^{ème} jour d'exposition. Certaines réponses comportementales (comportement de buvée) et physiologiques (rythme cardiaque) au cours des deux premières semaines d'exposition à la tension ont mis en évidence une réponse de stress aigu transitoire. Après huit semaines d'exposition, les vaches exposées de manière permanente se sont habituées à la tension. Par contre, les vaches exposées de manière aléatoire ont manifesté des réponses physiologiques de stress et des modifications du comportement ce qui pourrait indiquer la présence d'un stress chronique modéré dû à la tension électrique imprévisible.

A moyen terme (6 semaines), l'exposition répétée à une tension de 3,5 V (2,4 mA) appliquée de manière permanente ou aléatoire au niveau de l'abreuvoir, n'a eu d'effet ni sur la croissance ni sur l'ingestion d'eau d'agneaux en croissance. Cependant, un nombre moins important de carcasses grasses, une plus faible concentration plasmatique en cortisol lors de l'abattage et un poids plus important des médullo-surrénales, suggèrent que l'exposition de manière permanente à une tension électrique pourrait induire une modification à moyen terme de la physiologie du stress chez l'agneau.

Chez les agnelles et les vaches laitières, les épreuves mises en place pour étudier la modification de la réactivité émotionnelle et de la motivation ont montré que l'exposition à moyen terme à un agent stressant modéré pourrait faciliter l'adaptation ultérieure de l'animal à une situation nouvelle de challenge.

En élevage, les tensions électriques parasites de faible niveau peuvent être considérées comme un agent stressant modéré n'influençant pas les performances de production mais générant une réponse de stress aigu transitoire et une éventuelle réponse de stress chronique modéré en cas de présence imprévisible des tensions parasites. Une grande variabilité individuelle de réponse a cependant été observée.

Mots clés : *tension électrique parasite, moutons, vaches laitières, physiologie du stress, comportement, production, imprévisibilité*