RAPPORT FINAL

Optimisation des pratiques postabattage afin de produire un agneau lourd de tendreté supérieure

Projet 09C54

Requérant

Fédération des producteurs d'agneaux et de moutons du Québec (FPAMQ)

Rédigé par :

Éric Pouliot
Étudiant au doctorat, Université Laval

Mireille Thériault
Adjointe de recherche,
Université Laval

François Castonguay

Chercheur en production ovine,
Université Laval

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation
Département des sciences animales

Projet réalisé dans le cadre du :
Programme d'appui financier aux regroupements et aux associations de producteurs désignés Volet C « Appui à la réalisation de projets novateurs et structurants »

Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec

Avril 2014

Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation accordée en vertu du Programme d'appui financier aux regroupements et aux associations de producteurs désignés - Volet C « Appui à la réalisation de projets novateurs et structurants ».

La reproduction d'extraits du présent document à des fins personnelles est autorisée à condition d'en indiquer la source.

Pour plus de renseignements :
François Castonguay, Ph. D.
Département des sciences animales
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation
Pavillon Paul-Comtois, Université Laval
2425 rue de l'Agriculture
Québec, G1V 0A6
Tél. : (418) 656-2131 poste 8358
Courrier électronique : françois.castonguay@fsaa.ulaval.ca

Remerciements

En tant que coordonnateur de l'équipe de recherche, je voudrais adresser des remerciements à toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce projet.

En premier lieu, je désire remercier la Fédération des producteurs d'agneaux et moutons du Québec (FPAMQ) et sa directrice de l'époque, Marie-Ève Tremblay, pour leur soutien et leur confiance dans la préparation du projet et le dépôt de la demande de financement. Merci au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) pour le financement du projet et à Agriculture et Agroalimentaire Canada qui a également contribué monétairement à la réalisation de cette recherche.

Merci au Dr Claude Gariépy, chercheur en qualité des viandes au Centre de recherche et de développement sur les aliments (CRDA) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Saint-Hyacinthe, qui a assuré l'encadrement scientifique du projet pour tout le volet touchant la qualité de la viande.

Je tiens à remercier très sincèrement et à souligner le travail passionné d'Éric Pouliot, étudiant au 3^{e} cycle au Département des sciences animales de l'Université Laval qui a participé à la rédaction des protocoles et a assuré leur exécution à l'abattoir et en laboratoire. Il a également réalisé la compilation et l'analyse statistique des résultats. Il se chargera aussi de la rédaction des articles scientifiques et de vulgarisation.

Du côté de mon équipe de recherche, je veux remercier Mireille Thériault, adjointe de recherche à Agriculture et Agroalimentaire Canada à l'époque, qui a collaboré à la coordination et à la réalisation du projet. Elle a participé à la planification des expériences, au suivi technique, au travail en abattoir, à l'analyse statistique des résultats et à la rédaction du rapport. Merci également à Geneviève Pouliot, étudiante de 1er cycle en agronomie qui a participé à la prise de mesures en abattoir.

Merci à nos collaborateurs de l'abattoir Luceville inc. qui ont bien voulu participer au projet et qui ont toujours cherché à nous faciliter la tâche. Leur compréhension et leur patience nous ont permis de mener à bien ce projet malgré son exécution dans des conditions commerciales. Merci à Christian Bernier et Marie-Claude Parisé, propriétaires de Sélection Berarc, pour avoir facilité la disposition des carcasses des agneaux.

Sans l'appui des organismes précédemment cités et sans le travail de tous ces nombreux collaborateurs, ce projet n'aurait pu être réalisé avec autant de succès. Merci très sincèrement à tous!

Dr François Castonguay, Ph. D.

Chercheur en production ovine
Département des sciences animales
Université Laval, Québec

Résumé

Le but de cette étude était de déterminer les conditions postabattage qui permettent d'optimiser la tendreté de la viande d'agneau et valider s'il existe bel et bien une fenêtre optimum de température de la carcasse à pH 6,0 qui améliorerait la qualité de la viande, tel que suggéré par l'industrie ovine australienne. Pour ce faire, 128 agneaux lourds ont été sélectionnés à l'abattoir. La moitié des carcasses ont reçu une stimulation électrique de bas voltage (ES) tandis qu'aucun traitement (NES) n'a été appliqué aux 64 autres. Les carcasses ES et NES ont ensuite été placées dans l'une des deux chambres de refroidissement : vitesse de refroidissement « standard ou normale » (N) à 1,1 ± 1,4 °C et « lente » (L) à 9,6 ± 1,0 °C. Les carcasses L y ont été gardées pendant 3 h, puis transférées dans la chambre N. Dans les premières 48 h, la température des carcasses et la chute du pH ont été mesurées. La perte à la cuisson, la force de cisaillement, l'indice de fragmentation myofibrillaire et la longueur des sarcomères ont aussi été déterminés.

Tels qu'anticipés, la stimulation électrique et le ralentissement de la vitesse de refroidissement des carcasses ont entraîné une chute du pH des carcasses plus rapide dans les premières heures post-mortem comparé au groupe non stimulé (ES > NES entre 0,75-24 h post-mortem, $P < 0,0001$; L > N entre 2-12 h post-mortem, $P < 0,05$). La stimulation électrique a donc permis de réduire considérablement la proportion de carcasses atteignant le pH 6,0 à des températures inférieures à 10 °C (17 vs 98 %, pour ES vs NES). Cependant, la variabilité a été importante. Chez les carcasses stimulées, le ralentissement de la vitesse de refroidissement (L) a accéléré l'atteinte du pH 6,0 (25,4 vs 15,7 °C pour ES-L vs ES-N; $P < 0,0001$), mais cette pratique n'a pas permis à un plus grand nombre de carcasses de le faire dans la fenêtre de température de 18-25 °C. Ainsi, seulement 28 % des carcasses ES ont atteint le pH 6,0 dans la zone ciblée par la recommandation australienne.

La viande provenant des carcasses ES était plus tendre et plus homogène en terme de tendreté. La longueur des sarcomères a été affectée par le traitement de stimulation, mais seulement

pour les carcasses refroidies plus rapidement (1,73 vs 1,61 µm pour ES-N vs NES-N; P = 0,0004). Ces résultats confirment la présence du phénomène de raccourcissement dû au froid dans les conditions de refroidissement utilisées présentement dans certains abattoirs et témoignent de l'efficacité de la stimulation électrique à contrer ce phénomène. De plus, les carcasses refroidies lentement ont également vu leur tendreté améliorée par la stimulation électrique, ce qui indique que d'autres processus seraient impliqués dans l'attendrissement de la viande chez les carcasses ES, notamment une protéolyse plus importante, tel que suggéré par des indices de fragmentation myofibrillaire supérieurs (P = 0,0027). Pour sa part, la vitesse de refroidissement des carcasses n'a pas eu d'effet sur la tendreté (P = 0,2323).

Cette étude n'a pas permis de mettre en place une procédure postabattage (refroidissement et stimulation électrique) permettant à un maximum de carcasses d'atteindre le pH 6,0 entre 18 et 25 °C. En fait, les données n'ont pas démontré que cette fenêtre ou celle élargie jusqu'à 35 °C a une importance significative pour la tendreté de la viande, contrairement à la recommandation australienne à ce sujet. Une température de la carcasse trop froide à pH 6,0, en deçà de 5 °C, engendrerait par contre plus de risque de produire une viande dure, malgré le fait qu'une certaine proportion de la viande serait tout de même acceptable. La stimulation électrique a permis de produire une viande plus tendre, et ce plus rapidement et pourrait donc s'avérer être un outil intéressant pour améliorer la tendreté de la viande d'agneau produite au Québec. Par contre, la variabilité de la réponse à la stimulation électrique illustre qu'il est primordial de déterminer les paramètres optimaux avant l'utilisation de cette technologie à plus grande échelle et d'effectuer un suivi régulier suite à son implantation en abattoir afin de s'assurer que son utilisation soit efficace et bénéfique. Par ailleurs, la pertinence d'accorder une période de maturation à la viande a été réitérée. L'importante amélioration de la tendreté de la viande d'agneau entre 3 et 8 j de maturation sous vide démontre à l'industrie que cette pratique est bénéfique pour la qualité du produit et relativement simple à appliquer puisqu'elle peut avoir lieu suite à la découpe et à l'emballage de la viande. Il est donc envisageable pour les abattoirs et transformateurs d'accorder une période d'environ une semaine de maturation à la viande

sans avoir à garder les carcasses plus longtemps dans les chambres de refroidissement. Finalement, indépendamment du traitement, la variabilité observée pour l'ensemble des paramètres mesurés démontre toute l'importance des facteurs intrinsèques à l'animal et des conditions préabattage pour la tendreté du produit final.

Table des matières

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ V

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX IX

LISTE DES FIGURES X

1. MISE EN CONTEXTE 11

2. OBJECTIFS 15

2.1. Objectif général 15

2.2. Objectifs spécifiques 15

3. PROTOCOLE 15

3.1. Répartition, abattage et traitements 15

3.2. Mesures, échantillonnages et découpe 17

3.3. Analyses de laboratoire 19

3.4. Analyses statistiques 23

4. RÉSULTATS 24

4.1. Répartition des carcasses dans les traitements 24

4.2. Chute de la température et du pH des carcasses 25

4.3. Température des carcasses à pH 6,0 27

4.4. Qualité de la viande 28

4.5. Qualité en fonction de la température à pH 6,0 37

5. DISCUSSION 39

5.1. Chute de la température et du pH des carcasses 39

5.2. Qualité de la viande 41

6. CONCLUSIONS 47

7. RÉFÉRENCES 48

ANNEXE 1 53

Liste des tableaux

TABLEAU 1. RÉPARTITION DES CARCASSES SOUMISES AUX TRAITEMENTS POSTABATTAGE[1] (STIMULATION ÉLECTRIQUE ET CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT) EN FONCTION DE LEUR PROFIL DE pH ET DE LEUR TEMPÉRATURE À pH 6,0 29

TABLEAU 2. PARAMÈTRES DE COULEUR DE LA VIANDE (LD) MATURÉE 3 OU 8 J SELON LES TRAITEMENTS POSTABATTAGE[1] (STIMULATION ÉLECTRIQUE ET CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT) 30

TABLEAU 3. PARAMÈTRES DE TENDRETÉ DE LA VIANDE (*LD*) MATURÉE 3 OU 8 J SELON LE TRAITEMENT POSTABATTAGE[1] (STIMULATION ÉLECTRIQUE ET CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT) 31

Liste des figures

FIGURE 1. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES TRAITEMENTS DES CARCASSES 16

FIGURE 2. SCHÉMATISATION DE LA VUE DORSALE DES LONGES D'AGNEAU (CARCASSE SUSPENDUE) ILLUSTRANT L'UTILISATION DES DIFFÉRENTES PARTIES POUR LES ANALYSES 19

FIGURE 3. CHUTE DE LA TEMPÉRATURE DES CARCASSES D'AGNEAUX SOUMISES À UNE VITESSE DE REFROIDISSEMENT NORMALE (N : 1,2 ± 0,9 °C PENDANT 24 H) OU LENTE (L : 9,3 ± 0,8 °C PENDANT 3 H ET 1,2 ± 0,9 °C JUSQU'À 24 H), PENDANT LES 24 PREMIÈRES HEURES *POST-MORTEM* (N = 105) 25

FIGURE 4. CHUTE DU PH DES CARCASSES D'AGNEAUX EN FONCTION DU TRAITEMENT POSTABATTAGE ET DU TEMPS *POST-MORTEM* (N = 105) 26

FIGURE 5. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES TEMPÉRATURES DES CARCASSES À PH 6,0 EN FONCTION DES TRAITEMENTS POSTABATTAGE (N = 105) 27

FIGURE 6. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES FORCES DE CISAILLEMENT EN FONCTION DES TRAITEMENTS POSTABATTAGE ET DE LA DURÉE DE MATURATION (N = 105) 32

FIGURE 7. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DE LA LONGUEUR DES SARCOMÈRES EN FONCTION DES TRAITEMENTS POSTABATTAGE (N = 80) 34

FIGURE 8. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES INDICES DE FRAGMENTATION MYOFIBRILLAIRE EN FONCTION DES TRAITEMENTS POSTABATTAGE ET DE LA DURÉE DE LA MATURATION (N = 80) 35

FIGURE 9. ACTIVITÉS ENZYMATIQUES DE LA µ-CALPAÏNE, DE LA M-CALPAÏNE ET DE LA CASPASE 3/7 DURANT LES PREMIÈRES 196 H *POST-MORTEM* SUIVANT UN TRAITEMENT DE STIMULATION ÉLECTRIQUE (ES-N) OU NON (NES-N) DE LA CARCASSE. 36

FIGURE 10. RELATION ENTRE LA TEMPÉRATURE DE LA CARCASSE À PH 6,0 ET LA FORCE DE CISAILLEMENT APRÈS 3 ET 8 J DE MATURATION (A ET B), LA LONGUEUR DES SARCOMÈRES (C) ET L'INDICE DE FRAGMENTATION MYOFIBRILLAIRE (IFM) APRÈS 3 ET 8 J DE MATURATION (D ET E). 38

1. Mise en contexte

Puisque la viande d'agneau est perçue comme un produit haut de gamme relié au plaisir, il est primordial d'être en mesure de satisfaire les besoins des consommateurs et de combler leurs attentes en offrant un produit de qualité supérieure… à la hauteur des attentes! Ceci est d'autant plus vrai dans le contexte actuel de mondialisation où la concurrence devient de plus en plus féroce, non seulement en termes de prix et de quantité, critères difficiles à égaler, mais également en termes de qualité. En effet, la Nouvelle-Zélande et l'Australie travaillent sur la qualité de leurs produits depuis des années et ils ont mis sur pied des programmes de contrôle qui touchent l'ensemble des pratiques de production afin d'optimiser la qualité de la viande produite pour les différents marchés visés. Ils sont donc en mesure d'offrir un produit de qualité en grande quantité : un produit homogène dont le prix est inférieur à celui de l'agneau du Québec, ce qui fait d'eux des concurrents plus que sérieux. Il est primordial pour l'industrie ovine québécoise de se doter d'outils et de pratiques qui permettront de mettre en marché un produit de qualité supérieure afin de se démarquer d'une façon réelle et mesurable de la concurrence.

Les conditions postabattage jouent un rôle crucial dans la qualité de la viande. Au Québec, les principaux abattoirs d'agneaux abattent et transforment plusieurs espèces. Leurs chambres de refroidissement sont conçues pour refroidir efficacement les carcasses volumineuses de bœufs et/ou de porcs dans le but d'assurer une qualité microbiologique élevée. Dans cette optique, la plupart des abattoirs au Québec ont amélioré l'efficacité de leurs systèmes de refroidissement au cours des dernières années. Cependant, puisque les carcasses d'agneaux sont plus petites, elles disposent d'un plus grand rapport surface/volume, ce qui facilite les échanges thermiques et permet un refroidissement très rapide. Par contre, un refroidissement trop rapide des carcasses d'agneaux pourrait affecter négativement la qualité, particulièrement la tendreté. Il a tout récemment été démontré que le refroidissement des carcasses d'agneaux est effectivement trop rapide dans certains abattoirs ovins du Québec et qu'il

ne permet pas à la viande d'agneau d'atteindre son plein potentiel de tendreté (Pouliot *et al.* 2009; Pouliot *et al.* 2012). Les mesures réalisées dans trois importants abattoirs du Québec montraient qu'en général, les carcasses atteignaient une température inférieure à 10 °C alors que le pH était toujours supérieur à 6,2 (Pouliot *et al.* 2009). Sous ces conditions, les carcasses sont soumises au phénomène de raccourcissement musculaire dû au froid (« cold shortening »), reconnu pour son impact négatif sur la tendreté (Pearson et Young 1989; Honikel 2004).

Maturation et stimulation électrique. À partir de ce constat, la suite des travaux de recherche de doctorat d'Éric Pouliot à l'Université Laval a porté sur l'évaluation de deux pratiques postabattage bien connues pour avoir des effets bénéfiques sur la tendreté de la viande : la stimulation électrique et la maturation des carcasses.

La stimulation électrique des carcasses, qui consiste à leur appliquer un courant électrique à bas, moyen ou haut voltage pendant quelques dizaines de secondes, est un moyen fort intéressant d'améliorer la tendreté des viandes puisqu'elle engendre une glycolyse plus rapide (c'est-à-dire une utilisation anaérobie des réserves d'énergie qui engendre une chute du pH), qui permet d'accélérer l'atteinte du *rigor mortis* et conséquemment réduit les risques de « cold shortening ». La stimulation électrique est une procédure standard lors de l'abattage des bovins et ovins en Australie et en Nouvelle-Zélande et elle a pour but d'optimiser la qualité de la viande produite (Hopkins *et al.* 2008; Simmons *et al.* 2008). En Australie, le programme « Sheep Meat Eating Quality » recommande que les carcasses d'agneaux atteignent le pH 6,0 entre 18 et 25 °C, ce qui permettrait d'obtenir une tendreté optimale pour le marché local (Thompson *et al.* 2005; Pearce *et al.* 2009). Sous ces conditions, non seulement le risque de « cold shortening » est réduit, mais la viande s'attendrit également plus rapidement et atteint une tendreté supérieure (Thompson *et al.* 2005; Simmons *et al.* 2008). Dans cette optique, il est légitime de penser que l'industrie ovine québécoise devrait

également cibler cet objectif (pH 6,0 entre 18 et 25 °C) dans une vision à moyen terme du développement des marchés afin d'optimiser la qualité de son produit.

Parallèlement, il est depuis longtemps reconnu que la viande subit d'importants changements durant les jours suivant le *rigor mortis* (rigidité cadavérique suite à l'épuisement des réserves énergétiques), changements qui mènent à l'attendrissement de la viande. L'activité protéolytique, c'est-à-dire la dégradation des structures musculaires par les différentes enzymes, explique une grande partie des changements qui surviennent durant cette période. Toutefois, pour des raisons économiques (coûts d'entreposage, espace limité, débit d'abattage important, etc.) et microbiologiques, la maturation de la viande n'est plus une pratique très courante de nos jours. Les coupes de viande des différentes espèces se retrouvent très rapidement dans les comptoirs de vente ou chez les restaurateurs. Certains restaurants (ex : la chaîne de restaurants Le Bâton Rouge, la Maison Magnan à Montréal), boucheries, magasins d'alimentation (Métro avec le bœuf *Gril Rouge Angus*) et même certains distributeurs (Cargill avec le programme *Angus Pride*) en reconnaissent l'importance et accordent une période de maturation à leur viande de manière à favoriser la tendreté de leur produit.

Les recherches subséquentes de Pouliot et al. (2009; 2012) visaient donc à trouver la meilleure combinaison de ces pratiques postabattage en regard à la qualité de la viande d'agneau. La stimulation électrique, telle qu'appliquée dans l'étude, a permis de produire une viande significativement plus tendre que la viande d'agneau « standard » non stimulée. Les données recueillies suggèrent également que la période de maturation de la viande serait trop courte (arrivée en marché en trois jours) pour permettre un attendrissement maximal et pour qu'un bon pourcentage de la viande soit commercialisé alors que la tendreté est sous le seuil d'acceptabilité des consommateurs. Les résultats cette étude québécoise ont aussi montré que la viande des carcasses stimulées et maturées pendant trois jours avait une tendreté équivalente à celle provenant des carcasses non stimulées, mais maturées pendant huit jours. La

tendreté maximale était toutefois atteinte en combinant la stimulation électrique à une maturation de huit jours. La stimulation électrique a ainsi permis de contrer les effets néfastes du refroidissement trop rapide des carcasses d'agneaux alors que la maturation a permis une amélioration de la tendreté par le travail des enzymes sur la dégradation des structures musculaires. En fin de compte, la combinaison de ces deux pratiques a permis de produire une viande de tendreté supérieure, et ce, plus rapidement. De plus, ces pratiques n'engendrent pas de coût exorbitant. Dans le cas de la maturation, il faut être en mesure de garder la viande en chambre froide une fois qu'elle a été découpée et emballée. Pour ce qui est de la stimulation, il faut compter environ 5 000 $ pour l'achat de l'appareil avec un coût d'utilisation presque nul. La stimulation électrique pourrait donc s'avérer être une arme exceptionnelle pour permettre à la viande d'agneau du Québec de se démarquer par rapport aux produits extérieurs.

Où en sommes-nous? Malgré qu'elle ait donné des résultats éloquents et qu'elle soit donc très prometteuse, la procédure de stimulation électrique employée dans les études de Pouliot et al. (2009; 2012) n'a pas permis d'atteindre les conditions optimales recherchées pour les carcasses durant les 24 premières heures postabattage, en termes de chute du pH et de température (pH 6,0 entre 18 et 25 °C). En effet, le pH 6,0 était atteint lorsque la température était sous les 5 °C. Cette situation serait due à la vitesse de refroidissement des carcasses vraiment trop élevée dans nos abattoirs : de 37 °C à 5 °C en 5 h dans ce cas-ci. Or, la norme de l'ACIA exige que la carcasse atteigne 7 °C ou moins dans les 24 h suivant l'habillage[1] (ACIA 2009). Il est essentiel de bien coordonner la diminution du pH et de la température des carcasses pendant les premières 24 h afin de créer des conditions optimales pour exploiter au maximum le potentiel de tendreté de la viande d'agneau. Il est donc raisonnable de croire que l'amélioration de la tendreté observée pour les carcasses stimulées électriquement pourrait être encore plus importante si les conditions de refroidissement des carcasses étaient optimales.

[1] L'habillage correspond à l'enlèvement de la peau, de la tête et à l'éviscération. Les produits de l'habillage sont la carcasse et le cinquième quartier.

2. Objectifs

2.1. Objectif général

Développer des pratiques postabattage qui permettront à l'industrie ovine québécoise de mettre en marché une viande d'agneau de qualité supérieure dans l'objectif de se démarquer de façon réelle et mesurable de la concurrence.

2.2. Objectifs spécifiques

- Mettre en place une procédure postabattage (refroidissement et stimulation électrique) qui permettra à un maximum de carcasses d'atteindre le pH 6,0 entre 18 et 25 °C;
- Déterminer si cette procédure améliore la tendreté de la viande comparativement à la stimulation électrique appliquée dans les conditions de refroidissement actuelles;
- Déterminer la meilleure combinaison entre les conditions de refroidissement et la stimulation électrique des carcasses afin d'optimiser la tendreté de la viande d'agneau;
- Étudier l'effet des conditions et des pratiques postabattage sur le processus d'attendrissement et la tendreté finale de la viande d'agneau.

3. Protocole

Pour atteindre les objectifs fixés, les effets de la stimulation électrique et du refroidissement seront étudiés dans une expérience factorielle 2 × 2, c'est-à-dire deux traitements de stimulation (non stimulé : NES et stimulé : ES), deux vitesses de refroidissement (actuellement utilisée ou « normale » : N et lente : L), et ce, avec des mesures répétées à deux temps de maturation (3 jours : T3 et 8 jours : T8).

3.1. Répartition, abattage et traitements

Un total de 128 agneaux commerciaux mâles (32 par traitement) entre 38 et 52 kg de poids vif ont été abattus (carcasse chaude 22,4 ± 1,9 kg). Les abattages se sont déroulés sur 8 journées, entre juin et septembre 2010. Chaque semaine, 16 agneaux provenant

de différents producteurs ont été sélectionnés. Ces agneaux ont été pesés la veille de l'abattage et répartis dans un des quatre traitements (Figure 1) suivants de façon à uniformiser le poids moyen des carcasses entre les traitements :

NES-N : Aucune stimulation électrique de la carcasse (NES) et conditions de refroidissement « normales » (N);

ES-N : Stimulation électrique des carcasses (ES) et conditions de refroidissement « normales » (N);

ES-L : Stimulation électrique des carcasses (ES) et refroidissement plus lent (L), permettant aux carcasses d'atteindre le pH 6,0 à une température de 18 et 25 °C;

NES-L : Aucune stimulation électrique (NES) et refroidissement plus lent (L), permettant aux carcasses d'atteindre le pH 6,0 à une température de 18 et 25 °C.

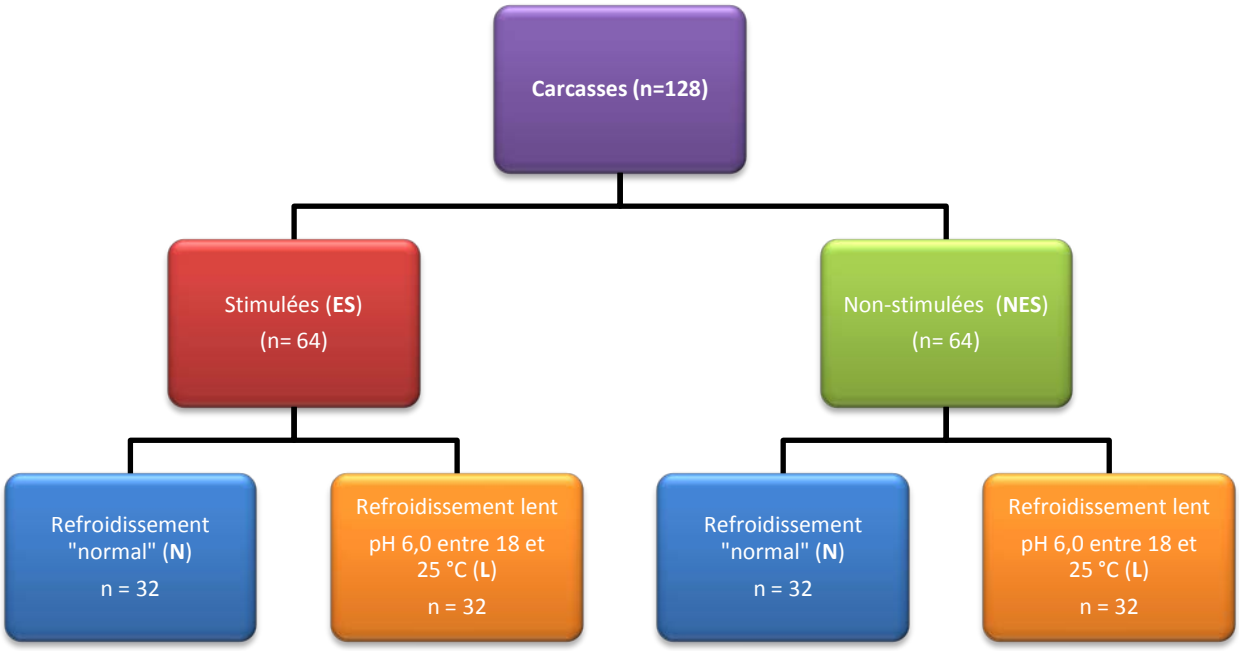

Figure 1. Représentation schématique des traitements des carcasses

Chaque fois, les agneaux ont été abattus en deux groupes de 8, décalés d'environ 1,5 h afin de permettre à l'équipe de prendre les mesures du premier groupe. À l'abattage, les agneaux étaient d'abord insensibilisés, puis saignés par sectionnement de la veine jugulaire. Pour les groupes de carcasses stimulés, un traitement de 30 sec était appliqué dans les 10 min *post-mortem* à l'aide d'un appareil industriel à bas voltage (21 V; 0,25 A, Jarvis, Modèle ES-4, Middletown, CO, É.-U.) utilisé selon la procédure du fabricant. Par la suite, les carcasses (stimulées ou non) étaient éviscérées et déshabillées selon la procédure habituelle de l'abattoir.

Chacune des carcasses a été pesée à chaud et ensuite placée dans une salle de refroidissement. Le délai entre l'abattage et l'entrée dans la chambre de refroidissement était d'environ 20-25 min. À ce moment, les agneaux des traitements NES-N et ES-N étaient transportés vers la salle de refroidissement « normal » dont la température était de 1,2 ± 0,9 °C. Les carcasses des traitements NES-L et ES-L étaient placées dans une chambre de refroidissement tempérée (refroidissement Lent) dont la température était 9,3 ± 0,8 °C. Ces carcasses restaient dans cette chambre environ 3 h, soit jusqu'à ce que les carcasses du traitement ES-L aient atteint le pH désiré dans la fenêtre de température idéale (6,0 entre 18 et 25 °C) selon la procédure déterminée lors d'essais préliminaires. À ce moment, les carcasses NES-L et ES-L étaient ramenées dans la salle de refroidissement « normal », avec les carcasses NES-N et ES-N où elles restaient jusqu'au lendemain matin. Les carcasses ont été classifiées selon la méthode d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (1992) par un classificateur de la Fédération des producteurs d'agneaux et moutons du Québec.

3.2. Mesures, échantillonnages et découpe

Au cours de cette période, la vitesse de refroidissement des carcasses ainsi que la vitesse de chute du pH ont été évaluées. Pour ce faire, des mesures du pH (pH mètre 200 series pH meter, Beckman Instruments, inc, Brea, CA muni d'une sonde Mettler-Toledo LoT406-M6-DXK-S7/25, Mettler Toledo Ingold Inc., Bedford, MA, É.-U.) et de la température du muscle longissimus dorsi (LD) ont été prises à 0,75, 2, 3, 6, 12 et 24 h

post-mortem sur la longe courte gauche. Des échantillons provenant du LD ont également été prélevés (0,75 et 24 h *post-mortem*) sur la longe courte gauche avant d'être découpés en petits cubes, congelés dans l'azote liquide et conservés à -80 °C.

Le lendemain matin, les carcasses ont été découpées et les longes gauche et droite de chaque carcasse ont été récupérées puis séparées en carré et longe courte. Une tranche de viande a été prélevée sur chaque carré. Les carrés gauche et droit et les tranches correspondantes de chaque carcasse ont ensuite été emballés sous vide et conservées à 4 °C pour une période de maturation de 3 ou 8 j (répartition des carrés gauche et droit et leurs tranches respectives entre les temps de maturation dans chaque traitement), après quoi elles ont été congelées à -30 °C jusqu'aux analyses subséquentes. La longe courte gauche a elle aussi été conservée à 4 °C jusqu'à 48 h *post-mortem*. Le pH ultime (pHu) a alors été mesuré et une tranche de viande a été prélevée et congelée. Des échantillons provenant du LD ont également été prélevés à 48, 72 et 196 h *post-mortem* sur la longe courte gauche avant d'être découpés en petits cubes, congelés dans l'azote liquide et conservés à -80 °C. La longe courte droite a été vendue avec le reste de la carcasse. Les carrés ont, par la suite, servi à la détermination de la couleur, de la perte à la cuisson et de la force de cisaillement, tandis que les tranches correspondantes ont été utilisées pour déterminer l'indice de fragmentation myofibrillaire (IFM). Les tranches prélevées à 48 h ont été utilisées afin de mesurer la longueur des sarcomères. La figure 2 illustre l'utilisation des différentes parties de la longe.

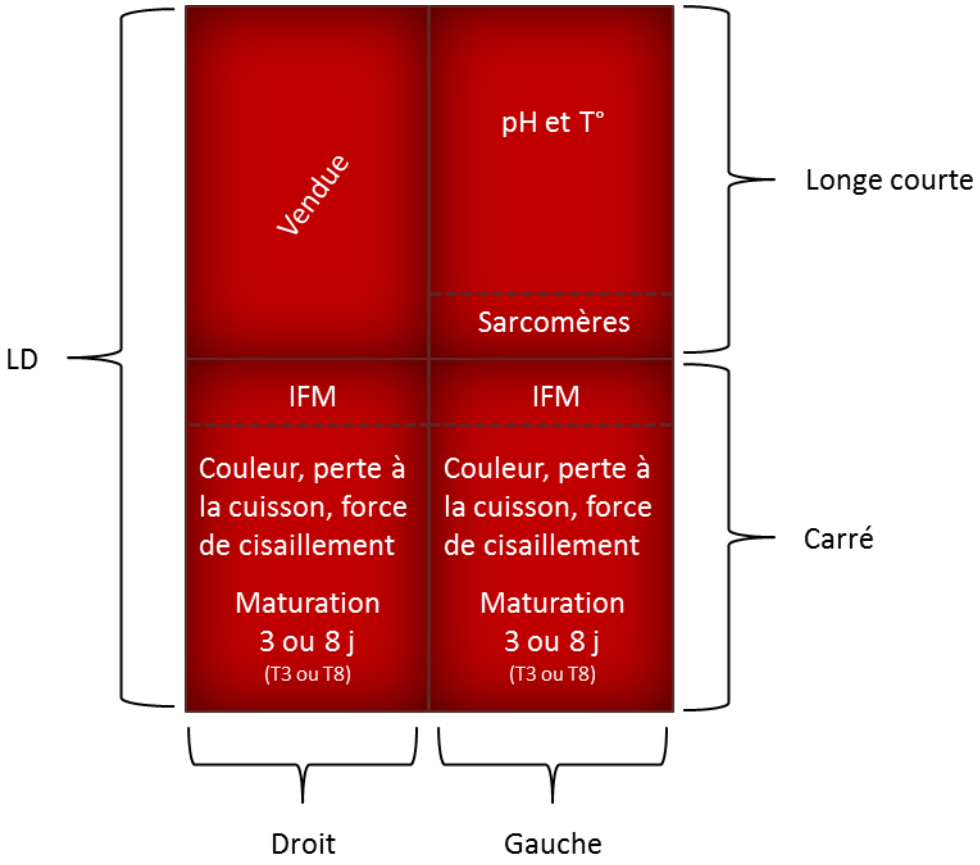

Figure 2. Schématisation de la vue dorsale des longes d'agneau (carcasse suspendue) illustrant l'utilisation des différentes parties pour les analyses

3.3. Analyses de laboratoire

Couleur, perte à la cuisson et force de cisaillement. La couleur, la perte à la cuisson ainsi que la force de cisaillement ont été mesurées au cours de la même manipulation sur les carrés de longe provenant des carcasses soumises aux différentes combinaisons de traitements de stimulation électrique (ES ou NES), température de refroidissement (N ou L) et temps de maturation (T3 et T8). Initialement, il avait été prévu de mesurer les forces de cisaillement sur seulement la moitié des carcasses, l'autre moitié étant réservée aux analyses sensorielles. Cependant, nous avons préféré avoir une mesure objective de la tendreté pour toutes les carcasses du projet et, ainsi, pouvoir la relier avec les autres paramètres de qualité de viande évalués. Les résultats similaires pour la

force de cisaillement et la tendreté déterminée par le panel obtenus lors de précédentes études viennent appuyer ce choix (Pouliot *et al.* 2009; Pouliot *et al.* 2012).

Pour les analyses, les pièces congelées ont été placées dans une chambre à 4 °C pour une période de 48 h afin d'être décongelées. Par la suite, les pièces ont été découpées de manière à isoler le LD qui a été dépouillé de son gras de couverture et de l'épimysium. À ce moment, une tranche a été découpée de chaque morceau et a été exposée à l'air pendant 30 min afin de permettre l'oxygénation. À l'aide d'un colorimètre (Chroma meter CR-300 et Data processor DP-301, Minolta Co., Ltd., Osaka, Japon) les paramètres de couleur L* (clarté), a* (axe vert-rouge) et b* (bleu-jaune) ont été déterminés en triplicata sur la tranche de chaque LD. Pour leur part, les LD ont été pesés et cuits au four à convection jusqu'à une température interne de 68 °C. Une fois cuite, la viande a été entreposée à 4 °C jusqu'au lendemain. La viande a ensuite été placée à la température ambiante pour une période de deux heures avant d'être pesée de nouveau. La différence de poids alors enregistrée représente la perte à la cuisson. Chaque pièce de viande a ensuite été soumise au test de force de cisaillement. Pour ce faire, les pièces de viande ont été découpées parallèlement aux fibres musculaires de manière à obtenir des bâtonnets de 1 cm^2 d'environ 5 cm de longueur. De 9 à 14 bâtonnets par pièce de viande ont été placés un à un sur un texturomètre (TA-XT2i Texture Analyser, Stable micro System, Godalming, Surrey, Royaume-Uni) afin d'être découpés perpendiculairement aux fibres musculaires par la géométrie Warner-Bratzler. Le programme Texture Exponent 32 (Stable micro System, Godalming, Surrey, Royaume-Uni) a permis de mesurer la force nécessaire au cisaillement.

Longueur des sarcomères. La longueur des sarcomères est une mesure de la contraction des fibres musculaires. Elle permet de déterminer dans quelle proportion les carcasses sont affectées par le phénomène de « cold shortening » au cours du refroidissement, en plus de valider les avantages de la procédure de stimulation électrique sur les carcasses. La longueur des sarcomères a été déterminée à partir d'un

sous-échantillon de 80 tranches soumises à 48 h de maturation (20 tranches par stimulation × refroidissement). Pour ce faire, 2,5 g de muscle ont été homogénéisés dans 25 ml d'une solution de sucrose 0,2 M pendant 40 sec à une vitesse maximale de 14 000 rpm (IKA T-18 Basic Ultra Turrax Homogenizer, IKA Works inc., Wilmington, NC, É.-U.). Ensuite, 25 ml de tampon ont été ajoutés et la solution a été agitée. Une goutte de la solution obtenue est déposée sur une lame et recouverte d'une lamelle. À l'aide d'un microscope (Nikon Eclipse TE2000-E, Nikon Canada Instruments inc., Mississauga, ON, Canada) muni d'une caméra digitale (ORCA-ER, Hamamatsu Photonics, Hamamatsu city, Japon), 25 myofibrilles ont été photographiées sous un objectif de 100X. Pour être considérée, chacune des myofibrilles devait être constituée d'un minimum de 10 sarcomères. La distance moyenne entre les sarcomères a été mesurée avec le logiciel ImageJ (http://rsbweb.nih.gov/ij/).

Indice de fragmentation myofibrillaire (IFM). Cette analyse permet de déterminer le niveau de dégradation des structures myofibrillaires sous l'action des enzymes responsables de l'attendrissement de la viande. La fragmentation myofibrillaire a été mesurée sur les tranches de viande soumises à 3 et 8 j de maturation selon l'approche décrite par Hopkins et al. (2000), qui est basée sur la méthode de Culler et al. (1978). Un sous-échantillon de 160 tranches a été utilisé (20 tranches par stimulation × refroidissement × temps de maturation). Pour ce faire, 2 g de muscle ont été homogénéisés (IKA T-18 Basic Ultra Turrax Homogenizer, IKA Works inc., Wilmington, NC, É.-U.) dans 25 ml d'une solution tampon (KH_2PO_4 7 mM, K_2HPO_4 18 mM, KCl 0,1 M, EDTA 1 mM et NaN_3 1 mM) sur glace pendant deux séquences de 30 sec à une vitesse maximale de 14 000 rpm. L'homogénat a été passé à travers un filtre possédant des pores de 1 mm^2 à l'aide de 20 ml de tampon. La suspension de myofibrilles a été centrifugée une première fois (10 min, 2 100 rpm, 2 °C) avant d'être décantée et remise en suspension à l'aide de 30 ml de tampon. Ces étapes ont été répétées et les myofibrilles ont été remises en suspension dans 40 ml de tampon froid. La concentration protéique a été déterminée par la méthode de Biuret (Gornall *et al.* 1949)

et les échantillons ont été dilués à 0,5 mg/ml en triplicata. La densité optique de l'échantillon a été mesurée à 540 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Genesys 10 UV, Thermo Spectronic, Rochester, NY, É.-U.).

Activités enzymatiques. Ces analyses permettent de déterminer l'activité des enzymes possiblement impliqués dans l'attendrissement de la viande afin de bien comprendre de quelle manière la stimulation et la maturation agissent sur les fibres musculaires et influencent la tendreté. L'activité des calpaïnes et celle des caspases 3/7 ont été mesurées sur un sous-échantillon de 6 NES et 6 ES refroidies sous conditions « normales » (N) à partir des échantillons prélevés à 0,75; 24; 48; 72 et 196 h et conservés à -80 °C. Suite à une phase de validation qui a permis de comparer l'effet de différents tampons d'extraction, il a été décidé d'utiliser un tampon d'extraction unique et commun pour la préparation des homogénats nécessaires à la mesure de l'activité des calpaïnes et des caspases 3/7. Ainsi, la préparation des homogénats pour mesurer l'activité des deux enzymes s'est faite en une seule étape. C'est le tampon décrit par Kemp et al. (2006) qui a finalement été choisi après les essais de validation : 25 mM HEPES (pH 7,5), 0,1 % (vol/vol) Triton X-100, 5 mM $MgCl_2$, 2 mM 1,4-Dithiothréitol (DTT), 74 µM antipain, 0,15 µM aprotinin, 1,3 mM EDTA, 20 µM leupeptin et 15 µM pepstatin. Pour chaque échantillon, 0,9 g de muscle a été homogénéisé sur glace dans 9 ml de tampon d'extraction pendant deux séquences de 20 sec à 17 500 rpm à l'aide d'un homogénéisateur (VDI 25, VWR International, Radnor, PA, É.-U.). L'homogénat a ensuite été centrifugé à 16 000 g pendant 30 min à 4 °C, puis le surnageant a été recueilli et conservé sur glace. La quantité de protéine a été déterminée par la méthode de Bradford (1976). L'activité des caspases 3/7 a été mesurée à l'aide de l'ensemble Apo-One Homogeneous Caspase-3/7 Assay (Promega, Madison, WI) tel que décrit par Kemp et al. (2006) suite à un temps d'incubation de 7,5 h. Elle est exprimée en unité de fluorescence relative par µg de protéine. L'activité caséinolytique de la µ-calpaïne et de la m-calpaïne a été mesurée suite à une séparation par électrophorèse en condition non-dénaturante, une technique appelée zymographie. Le protocole a été adapté de la

méthode décrite par Veiseth et al. (2001), basée sur Raser et al. (1995). Pour ce faire, un volume d'homogénat correspondant à 40 µg de protéine a été déposé sur un gel d'acrylamide (réception 4,8 % et migration 10 %) et le gel a été placé dans un tampon d'électrophorèse (25 mM Tris, 125 mM Glycine 1 mM EDTA et 0,05 % β-mercaptoéthanol). Il a été soumis à une tension de 125 V pendant 2,5 h sur glace. Le gel a ensuite été incubé à température ambiante toute la nuit dans un tampon d'incubation contenant du Ca^{++} (50 mM Tris, 5 mM $CaCl_2$ et 0,05 % β-mercaptoéthanol) nécessaire à l'activité des calpaïnes. Sous ces conditions, les deux isomères des calpaïnes dégradent la caséine contenue dans le gel. Une fois l'incubation terminée, le gel a été coloré au bleu de coomassie, le rendant bleu et laissant des bandes pâles là où la protéolyse a eu lieu, c'est-à-dire où les calpaïnes ont dégradé la caséine. L'intensité de ces bandes est proportionnelle à l'activité protéolytique du système et elle a été quantifiée à l'aide du logiciel d'analyse d'image ImageJ (http://rsbweb.nih.gov/ij/).

3.4. Analyses statistiques

Sur les 128 carcasses traitées, 21 présentaient des chutes de pH typiques au défaut de qualité de viande communément appelé DFD (« Dark, Firm and Dry » - viande foncée, dure et sèche). Ces carcasses ont donc été éliminées des analyses statistiques des chutes de pH et de température ainsi que des paramètres de qualité de la viande mesurés en laboratoire. Des 107 carcasses restantes, deux carcasses non stimulées ont présenté des chutes de pH anormales. Au final, ce sont donc 105 individus qui ont été considérés pour les analyses statistiques. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, É.-U.).

Pour le poids des carcasses chaudes, la conformation et l'épaisseur de gras au site GR (sur la 12^{e} côte à 11 cm de la ligne médiane), la journée d'abattage (1 à 8), le traitement de stimulation (NES ou ES), la vitesse de refroidissement (N ou L) et toutes les interactions possibles ont été considérés comme facteurs fixes dans le modèle statistique. Pour la chute de la température et du pH des carcasses dans les 48 h *post-mortem* la journée d'abattage, le traitement de stimulation, la vitesse de

refroidissement, le temps de mesure (1, 2, 3, 6, 12, 24 et 48 h) et toutes les interactions possibles ont été inclus comme effets fixes dans le modèle, alors que le poids de la carcasse et le GR ont été inclus comme covariables. Pour la couleur, la perte à la cuisson, la force de cisaillement et l'IFM, la journée d'abattage, le traitement de stimulation, la vitesse de refroidissement, le temps de maturation (3 ou 8 j) et toutes les interactions possibles ont été inclus comme effets fixes dans le modèle, alors que le poids de la carcasse et le GR ont été inclus comme covariables. Pour la longueur des sarcomères, la journée d'abattage, le traitement de stimulation, la vitesse de refroidissement et toutes les interactions possibles ont été inclus comme effets fixes dans le modèle, alors que le poids de la carcasse et le GR ont été inclus comme covariables. Dans tous les cas, les interactions et les covariables non significatives ont été retirées de façon séquentielle. Le choix de la structure de covariance a été basé sur le plus petit critère d'Akaike (AIC). Lorsque des interactions significatives étaient trouvées, l'option Slice de SAS a été utilisée afin d'analyser les effets simples.

La température à pH 6,0 a été déterminée pour chaque carcasse à l'aide du logiciel Matlab (MathWork, Natick, MA, É.-U.). Une régression non linéaire a été utilisée afin de déterminer le temps *post-mortem* au pH 6,0 et ce temps a été utilisé pour déterminer la température à pH 6,0. Les carcasses ont été regroupées selon leur température à pH 6,0 : $T \leq 10$ °C; 10 °C < T < 35°C (avec une sous-division à 18 °C < T < 25 °C) et $T \geq 35$ °C. Les relations entre la température à pH 6,0 et la force de cisaillement, la longueur des sarcomères et l'IFM ont été testées grâce à la procédure GLM de SAS (SAS Institute Inc. Cary, NC).

4. Résultats

4.1. Répartition des carcasses dans les traitements

Le poids des carcasses chaudes, la conformation des carcasses de même que l'épaisseur de gras au site GR ont été respectivement de 22,4 ± 1,9 kg, 3,3 ± 0,4 et 11,2 ± 3,0 mm (moyenne et écart-type). Bien que certaines de ces caractéristiques aient varié entre les journées d'abattage, aucune différence n'a été observée entre les traitements de

stimulation et de refroidissement pour une journée donnée d'abattage ou pour l'ensemble des huit semaines (P > 0,5; données non présentées).

4.2. Chute de la température et du pH des carcasses

Sans surprise, la chute de température des carcasses a été identique pour les carcasses stimulées et non stimulées (P = 0,7255). Le traitement de refroidissement a été effectif puisque les carcasses refroidies lentement (L) étaient plus chaudes que celles refroidies normalement (N) dans les 12 premières heures *post-mortem* (Figure 3; P < 0,0001).

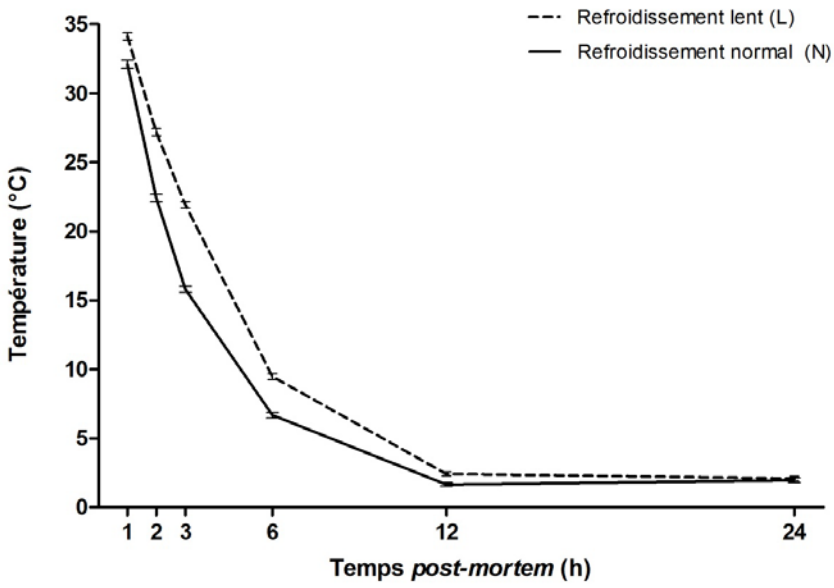

Figure 3. Chute de la température des carcasses d'agneaux soumises à une vitesse de refroidissement normale (N : 1,2 ± 0,9 °C pendant 24 h) ou lente (L : 9,3 ± 0,8 °C pendant 3 h et 1,2 ± 0,9 °C jusqu'à 24 h), pendant les 24 premières heures *post-mortem* (n = 105)

Une proportion importante des carcasses (16,7 %) a montré un pHu (48 h *post-mortem*) supérieur à 5,8, valeur associée au défaut de qualité de viande appelé DFD (« Dark, Firm and Dry » - viande foncée, dure et sèche). D'ailleurs, la couleur de la viande provenant de ces carcasses différait en termes de L*, a* et b* de celle provenant des carcasses dont le pHu était normal (< 5.8), ce qui s'est traduit par une viande plus foncée, moins

rouge et plus bleue (données non présentées). Le pourcentage de carcasses DFD a toutefois été comparable dans chaque traitement.

La figure 4 montre la chute du pH des carcasses soumises aux différents traitements postabattage (excluant les carcasses DFD).

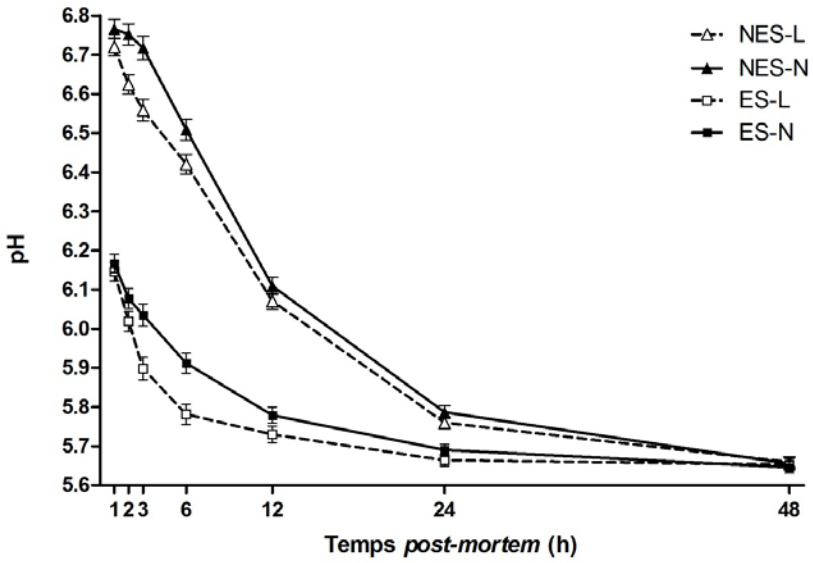

Figure 4. Chute du pH des carcasses d'agneaux en fonction du traitement postabattage et du temps *post-mortem* (n = 105)

NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent

Effet de la stimulation électrique. Telle qu'anticipée, la stimulation électrique des carcasses a entraîné une chute du pH plus rapide dans les 24 premières heures *post-mortem*, comparé aux carcasses non stimulées ($P < 0,0001$ aux temps 45 min, 2, 3, 6, 12 et 24 h). En moins d'une heure après l'abattage, les carcasses ES avaient un pH inférieur de 0,59 unité à celui des carcasses NES ($P < 0,0001$). Le pHu atteint à 48 h a toutefois été similaire entre les traitements de stimulation (5,66 vs 5,65 pour NES vs ES; $P = 0,6709$).

Effet de la vitesse de refroidissement. À 0,75 h de l'abattage, le pH des carcasses était similaire dans les deux chambres de refroidissement (6,47 vs 6,43 pour N vs L; $P = 0,1755$). Le ralentissement de la vitesse de refroidissement (L) a toutefois permis au

pH de s'abaisser plus rapidement entre 2 et 12 h *post-mortem* (différence de 0,04 à 0,14 unité de pH; P < 0,05), comparativement aux carcasses refroidies plus rapidement (N). À 24 h *post-mortem*, l'écart entre les traitements était moins apparent (5,74 vs 5,71 pour N vs L; P = 0,0673) et les carcasses des deux groupes ont finalement atteint un pHu identique (5,66 vs 5,65 pour N vs L; P = 0,7941).

4.3. Température des carcasses à pH 6,0

Les carcasses stimulées, que ce soit dans les conditions de refroidissement normales ou lentes, ont atteint le pH 6,0 à des températures nettement supérieures aux carcasses non stimulées. La température à pH 6,0 des carcasses ES-L a été plus élevée que celle des ES-N (25,4 vs 15,7 °C; P < 0,0001). Les carcasses NES ont, pour leur part, atteint le pH 6,0 à des températures similaires, peu importe la vitesse de refroidissement (1,2 et 2,5 °C pour NES-N et NES-L; P = 0,4919). Les températures à pH 6,0 ont été plus variables pour les carcasses ES que NES (Figure 5).

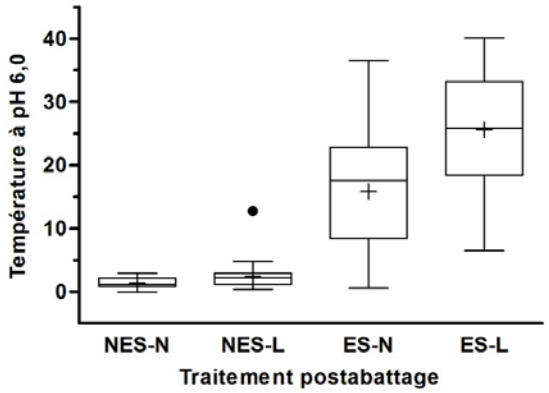

Figure 5. Représentation schématique de la distribution des températures des carcasses à pH 6,0 en fonction des traitements postabattage (n = 105)

Le trait inférieur de la boîte représente la valeur en dessous de laquelle se retrouve 25 % des individus (Q1 : 1er quartile), le trait central, 50 % (Q2 : 2e quartile, médiane) et le trait supérieur, 75 % (Q3 : 3e quartile). La moustache inférieure indique la plus petite valeur inférieure incluse dans la frontière basse, qui elle, correspond à Q1 - (1.5 × (Q3-Q1)). À l'inverse, la moustache supérieure est la plus grande valeur comprise dans la frontière haute (Q3 + (1.5 × (Q3-Q1)). Le signe « + » indique la valeur moyenne. Les valeurs en dehors des frontières haute ou basse sont représentées par un point noir.
NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent

Le regroupement des carcasses sur la base de leur température au moment de l'atteinte du pH 6,0 fournit des informations intéressantes (Tableau 1). La stimulation électrique a permis de réduire considérablement la proportion de carcasses atteignant le pH 6,0 à des températures inférieures à 10 °C, en comparaison avec les carcasses NES (17 vs 98 % pour ES vs NES respectivement). La majorité des carcasses ES a atteint le pH 6,0 entre 10 et 35 °C (38/53; Tableau 1). Toutefois, seulement 28 % (15/53) de ces carcasses l'ont fait dans la zone ciblée de 18-25 °C. Cinq carcasses ES-L ont également montré une chute de pH trop rapide, soit l'atteinte du pH 6,0 à des températures supérieures à 35 °C, comparativement à une seule des carcasses ES-N (19,2 vs 3,7 %; P = 0,0153). En contrepartie, 8 carcasses ES-N ont atteint le pH 6,0 en deçà de 10 °C comparativement à une seule pour ES-L (29,6 vs 3,8 %).

4.4. Qualité de la viande

Couleur. Des valeurs légèrement plus élevées pour les paramètres L*, a*et b* ont été obtenues pour la viande provenant des carcasses ES (Tableau 2), ce qui indique que la viande est plus claire, plus rouge et moins bleue. La maturation a également produit une viande plus claire et plus rouge (paramètres L* et a* supérieurs). Des tendances pour une interaction refroidissement × maturation ont été observées pour les paramètres a* et b* (P = 0,0628 et P = 0,0640). Dans ce cas, la maturation avait un effet significatif dans les conditions lentes de refroidissement (P < 0,05), mais pas dans les conditions normales (P > 0,5).

Perte à la cuisson. La perte à la cuisson n'a pas été affectée par la stimulation, le refroidissement ou la maturation de la viande (Tableau 3). Une tendance pour une interaction stimulation × refroidissement a été observée (P = 0,0909), mais aucun effet simple (refroidissement ou stimulation) n'a permis de bien expliquer la relation. En fait, bien que les moyennes semblaient varier dans le sens inverse selon le refroidissement pour les ES et les NES, les différences entre les moyennes étaient relativement faibles et peu importantes.

Tableau 1. Répartition des carcasses soumises aux traitements postabattage[1] (stimulation électrique et conditions de refroidissement) en fonction de leur profil de pH et de leur température à pH 6,0

	NES		ES			Valeur de P[3]		
	N	L	N	L	SEM	S	R	S×R
Nbre initial de carcasses	32	32	32	32				
DFD (pHu > 5,8)	7 (21,9)[2]	4 (12,5)	5 (15,6)	5 (15,6)		0,8743	0,4895	0,4895
Chute de pH anormale	1 (3,13)	0	0	1 (3,13)				
Nbre de carcasses « normales »[4]	24	28	27	26				
Température à pH 6,0								
≤ 10 °C	24 (100)	27 (96,4)	8 (29,6)	1 (3,8)		<0,0001	NS	NS
> 10 °C et < 35 °C	0	1 (3,6)	18 (66,7)	20 (76,9)		<0,0001	NS	NS
> 18 °C et < 25 °C	0	0	9 (33,3)	6 (23,1)		<0,0039	NS	NS
≥ 35 °C	0	0	1 (3,7)	5 (19,2)				

[1] NES : aucune stimulation électrique; ES : stimulation électrique; N : conditions de refroidissement normales; L : conditions de refroidissement plus lentes

[2] Nombre (%)

[3] S : stimulation électrique ; R : conditions de refroidissement ; NS : non significatif

[4] Carcasses considérées « Normales » en termes de chute du pH et de pHu

Tableau 2. Paramètres de couleur de la viande (LD) maturée 3 ou 8 j selon les traitements postabattage[1] (stimulation électrique et conditions de refroidissement)

	Maturée 3 j				Maturée 8 j								
	NES		ES		NES		ES			Valeur de *P*[2]			
	N	L	N	L	N	L	N	L	SEM	S	R	M	R × M
L*	37,6	37,4	39,1	39,0	38,0	38,0	39,1	39,7	0,5	0,001	0,8588	0,0238	
a*	12,2	12,5	13,7	13,2	12,5	13,0	13,7	14,0	0,3	<0,0001	0,541	0,0077	0,0628
b*	7,3	7,4	8,4	8,0	7,4	7,6	8,2	8,5	0,3	0,0001	0,8218	0,3661	0,0640

[1] NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent).

[2] S : stimulation électrique ; R : conditions de refroidissement ; M : maturation

Tableau 3. Paramètres de tendreté de la viande (*LD*) maturée 3 ou 8 j selon le traitement postabattage[1] (stimulation électrique et conditions de refroidissement)

	Maturée 3 j				Maturée 8 j								
	NES		ES		NES		ES			Valeur de *P*[2]			
	N	L	N	L	N	L	N	L	SEM	S	R	M	S × R
Perte à la cuisson (%)	30,2	29,2	29,4	30,2	29,8	30,2	29,4	29,9	0,4	0,6536	0,5801	0,8501	0,0909
Force de cisaillement (kg)	5,55	5,73	4,05	4,25	3,60	4,07	2,80	2,88	0,24	<0,0001	0,2323	<0,0001	
Long. sarcomères (µm)	1,61	1,68	1,73	1,73					0,02	0,0004	0,1028		0,1113
IFM[3]	69,1	62,8	74,0	75,5	96,4	95,1	98,2	101,0	2,9	0,0027	0,6934	<0,0001	

[1] NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent)

[2] S : stimulation électrique ; R : conditions de refroidissement ; M : maturation

[3] IFM : indice de fragmentation myofibrillaire

Force de cisaillement. La viande provenant des carcasses ES a une force de cisaillement inférieure à celle des NES; elle est donc plus tendre (Tableau 3). Toutefois, les bénéfices de la stimulation électrique sur la tendreté de la viande ne s'observent pas à chaque journée d'abattage (interaction journée d'abattage × stimulation; P = 0,0002). La stimulation électrique a tout de même permis d'améliorer de manière significative la tendreté de la viande lors de cinq des huit journées d'abattage.

La viande des carcasses ES a également obtenu des valeurs de force de cisaillement plus regroupées que celles des carcasses NES, tel qu'indiqué par la plus petite taille des boîtes ES-N et ES-L à la figure 6.

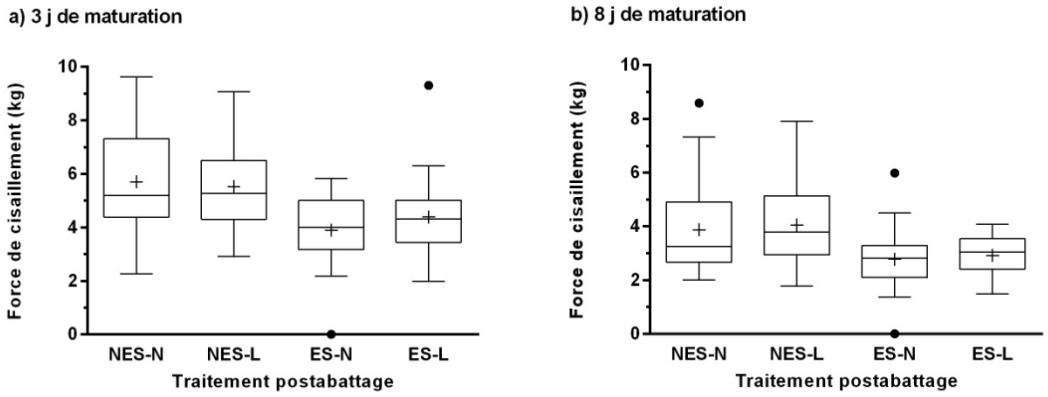

Figure 6. Représentation schématique de la distribution des forces de cisaillement en fonction des traitements postabattage et de la durée de maturation (n = 105)

Le trait inférieur de la boîte représente la valeur en dessous de laquelle se retrouve 25 % des individus (Q1 : 1er quartile), le trait central, 50 % (Q2 : 2e quartile, médiane) et le trait supérieur, 75 % (Q3 : 3e quartile). La moustache inférieure indique la plus petite valeur inférieure incluse dans la frontière basse, qui elle, correspond à Q1 - (1.5 × (Q3-Q1)). À l'inverse, la moustache supérieure est la plus grande valeur comprise dans la frontière haute (Q3 + (1.5 × (Q3-Q1)). Le signe « + » indique la valeur moyenne. Les valeurs en dehors des frontières haute ou basse sont représentées par un point noir.
NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent.

Pour sa part, la vitesse de refroidissement des carcasses n'a pas eu d'effet sur la tendreté (P = 0,2323). Par contre, l'interaction journée d'abattage × refroidissement était significative (P = 0,0307) due à un effet du refroidissement sur la tendreté à trois journées d'abattage sur les huit. Lors des jours d'abattage où le refroidissement a eu un impact, le refroidissement lent a produit une viande plus dure que le refroidissement rapide.

Tel qu'attendu, la viande maturée 8 j avait une force de cisaillement inférieure à celle maturée 3 j, et ce, peu importe le traitement de stimulation. Cependant, la maturation a produit un effet d'attendrissement (réduction de la force) plus important sur la qualité de la viande des carcasses NES que de celles des carcasses ES (-1,80 vs -1,31 kg; P = 0,0191).

Longueur des sarcomères. La longueur des sarcomères a été affectée par le traitement de stimulation, mais avait tendance à être différente seulement pour les carcasses soumises au refroidissement normal (Tableau 3; interaction stimulation × refroidissement P = 0,1113). En effet, les sarcomères étaient plus longs chez les carcasses ES-N que chez les carcasses NES-N (1,73 vs 1,61 µm; P = 0,0004). Par contre, pour les carcasses refroidies lentement, les sarcomères avaient sensiblement la même longueur (1,68 et 1,73 µm pour NES-L et ES-L; P = 0,1386). Par ailleurs, il est intéressant de constater que pour les carcasses NES, celles refroidies lentement avaient tendance à avoir des sarcomères plus longs que celles refroidies normalement (P = 0,1089). La figure 7 démontre également que plus de 50 % des carcasses NES-N et 25 % des carcasses NES-L ont des sarcomères plus courts que la longueur minimum observée chez les carcasses ES.

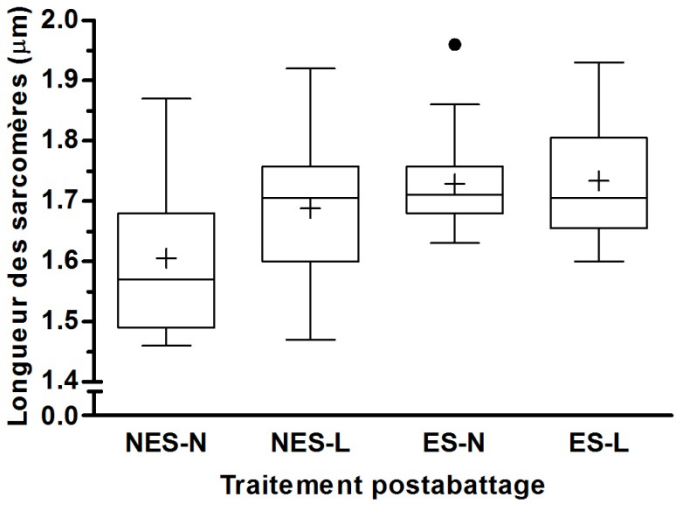

Figure 7. Représentation schématique de la distribution de la longueur des sarcomères en fonction des traitements postabattage (n = 80)

Le trait inférieur de la boîte représente la valeur en dessous de laquelle se retrouve 25 % des individus (Q1 : 1er quartile), le trait central, 50 % (Q2 : 2e quartile, médiane) et le trait supérieur, 75 % (Q3 : 3e quartile). La moustache inférieure indique la plus petite valeur inférieure incluse dans la frontière basse, qui elle, correspond à Q1 - (1.5 × (Q3-Q1)). À l'inverse, la moustache supérieure est la plus grande valeur comprise dans la frontière haute (Q3 + (1.5 × (Q3-Q1)). Le signe « + » indique la valeur moyenne. Les valeurs en dehors des frontières haute ou basse sont représentées par un point noir.
NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent.

Indice de fragmentation myofibrillaire. La viande provenant des carcasses ES avait un indice de fragmentation myofibrillaire (IFM) supérieur à celle des carcasses NES (Tableau 3). Toutefois, l'interaction stimulation × maturation tendait à être significative (p = 0,0967), suggérant que cette différence était plus importante à 3 j de maturation (74,6 vs 66,0 pour ES vs NES; P = 0,0036) qu'à 8 j (99,7 vs 95,6 pour ES vs NES; P = 0,0635). La maturation de la viande a aussi eu un effet positif sur l'IFM. De plus, la variation de l'indice est inférieure à 8 j comme le démontre la figure 8.

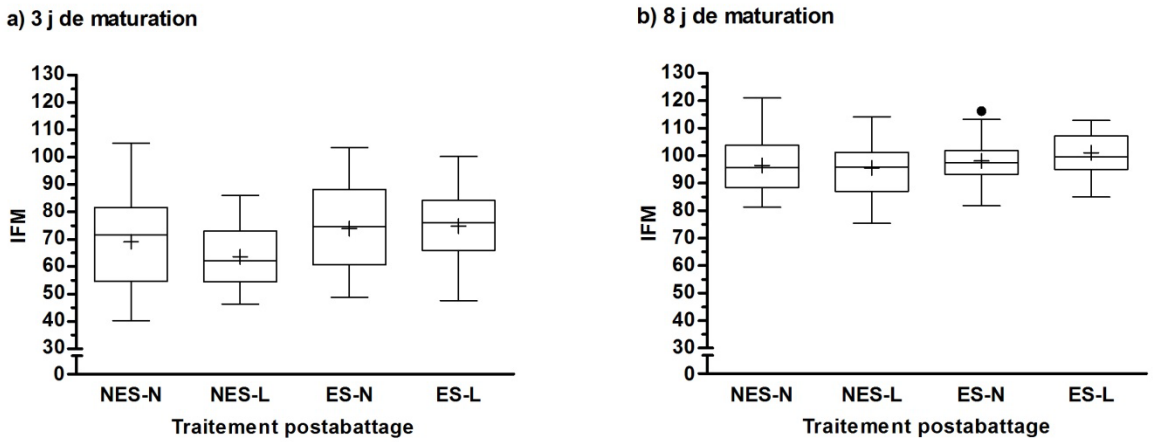

Figure 8. Représentation schématique de la distribution des indices de fragmentation myofibrillaire en fonction des traitements postabattage et de la durée de la maturation (n = 80)

Le trait inférieur de la boîte représente la valeur en dessous de laquelle se retrouve 25 % des individus (Q1 : 1er quartile), le trait central, 50 % (Q2 : 2e quartile, médiane) et le trait supérieur, 75 % (Q3 : 3e quartile). La moustache inférieure indique la plus petite valeur inférieure incluse dans la frontière basse, qui elle, correspond à Q1 - (1.5 × (Q3-Q1)). À l'inverse, la moustache supérieure est la plus grande valeur comprise dans la frontière haute (Q3 + (1.5 × (Q3-Q1)). Le signe « + » indique la valeur moyenne. Les valeurs en dehors des frontières haute ou basse sont représentées par un point noir.
NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent.

Activité enzymatique

Les activités enzymatiques de la µ-calpaïne et de la m-calpaïne (Figure 9) n'ont pas été influencées par le traitement de stimulation (P = 0,7533 et P = 0,8587, respectivement). Indépendamment du traitement, l'activité de la µ-calpaïne a décliné durant les heures *post-mortem* (P < 0,0001). Après 72 h, il ne restait plus que 40,1 % de l'activité initiale et seulement 10,9 % à 196 h. Dans le cas de la m-calpaïne, l'activité a légèrement décliné (P = 0,0024), conservant tout de même 84,1 % de l'activité initiale à 196 h *post-mortem*. D'ailleurs, seule l'activité à 196 h était significativement différente de celle à 1 h *post-mortem* (P = 0,0040). Dans le cas de l'activité de la caspase 3/7, la stimulation (P = 0,0203) et le temps (P < 0,0001) ont eu des effets significatifs. En fait, une interaction entre ces deux facteurs a été observée (P = 0,0158), puisque l'activité entre les ES et NES n'était différente significativement qu'à 1 h *post-mortem* (P = 0,0043).

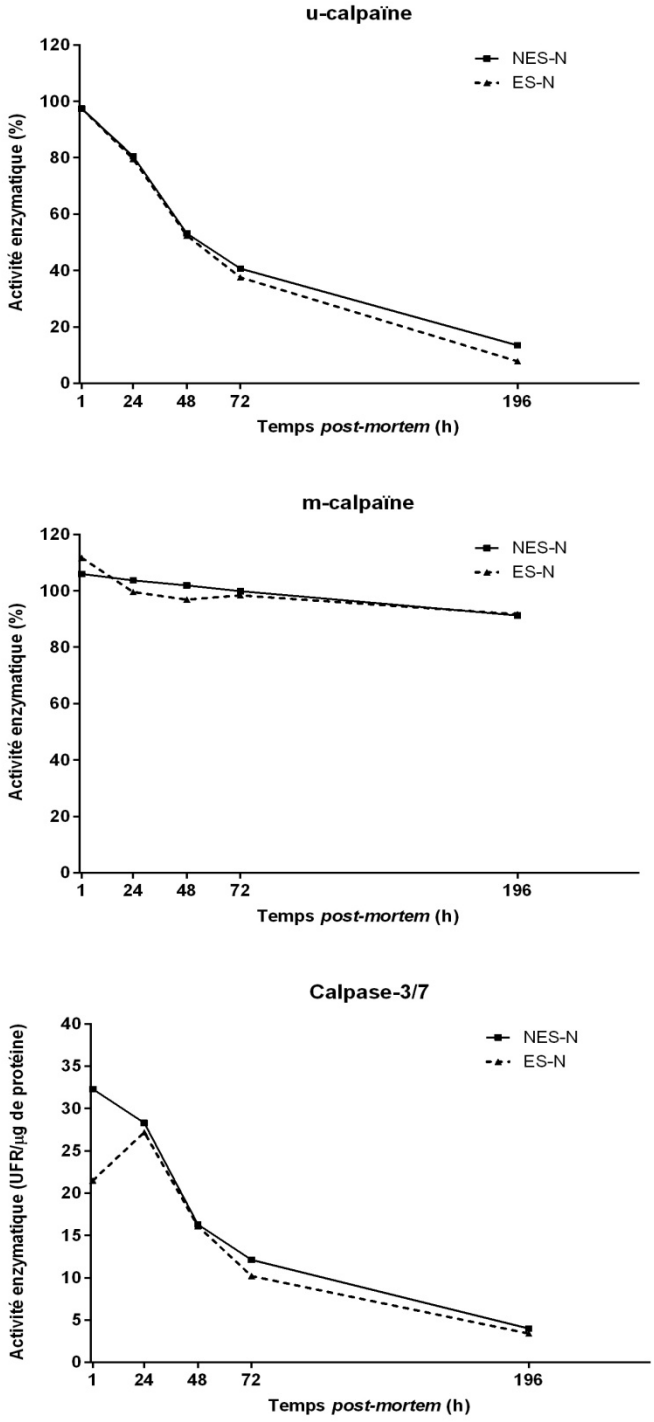

Figure 9. Activités enzymatiques de la µ-calpaïne, de la m-calpaïne et de la caspase 3/7 durant les premières 196 h *post-mortem* suivant un traitement de stimulation électrique (ES-N) ou non (NES-N) de la carcasse.

4.5. Qualité en fonction de la température à pH 6,0

Les données de force de cisaillement, de longueur des sarcomères et d'IFM présentées en fonction de la température à pH 6,0 (Figure 10), indiquent qu'aucune relation particulière entre la température à pH 6,0 et les paramètres de tendreté n'a été observée dans cette étude lorsque cette température était supérieure à 5 °C. Il y avait par contre une différence pour ces trois paramètres entre les carcasses qui ont atteint le pH 6,0 en dessous et au-dessus de 5 °C. Les carcasses ayant atteint le pH visé au-dessus de 5 °C, majoritairement des ES, étaient en moyenne plus tendre ($P < 0,0001$), avaient des sarcomères plus longs ($P = 0,0056$) et un IFM supérieur ($P = 0,0099$). La variation a toutefois été très importante pour l'ensemble de ces paramètres à une température donnée à pH 6,0 et particulièrement sous 5 °C où la force de cisaillement pouvait varier de plus de quatre fois et la longueur des sarcomères de plus de deux fois, malgré une température quasi identique.

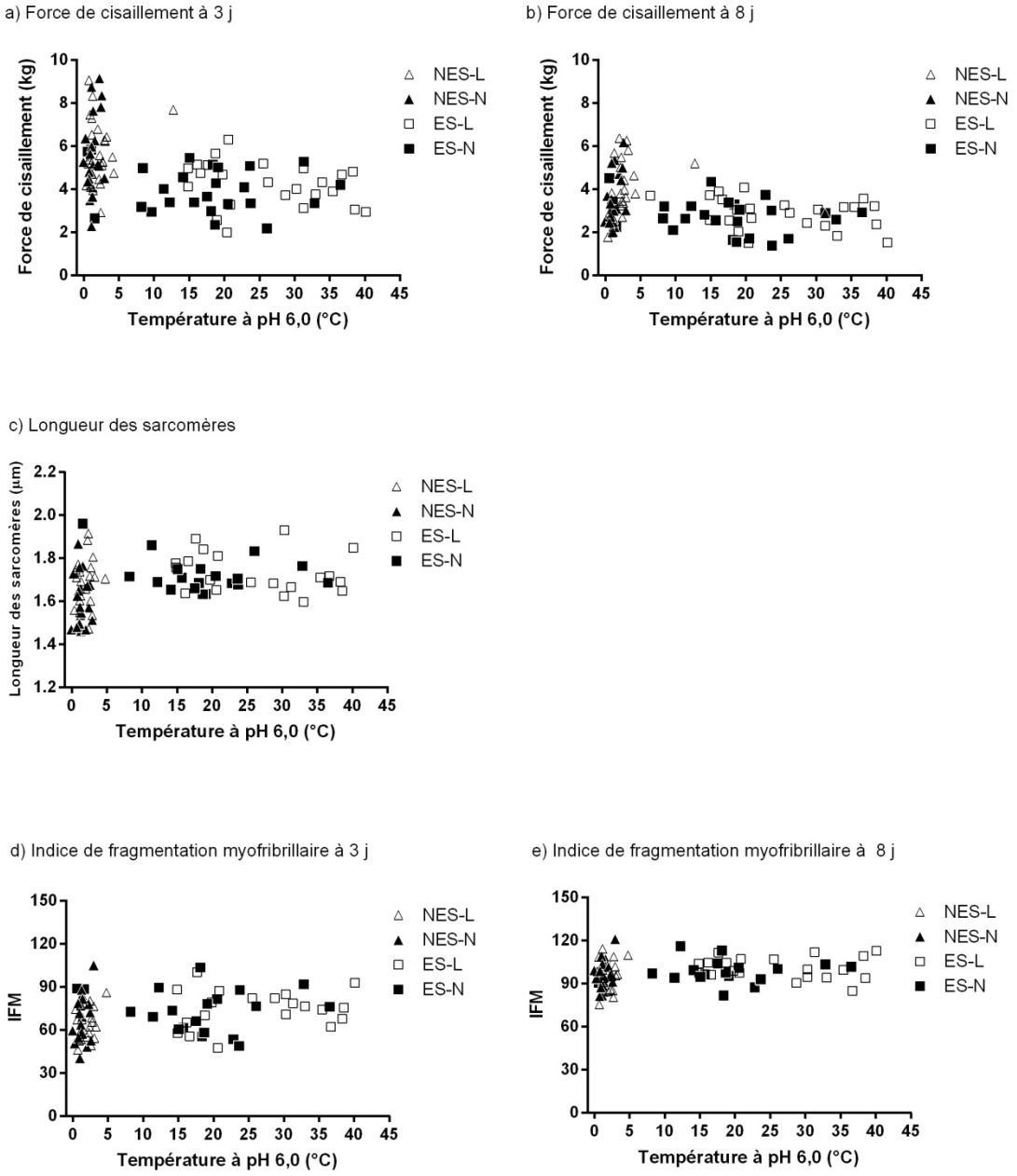

Figure 10. Relation entre la température de la carcasse à pH 6,0 et la force de cisaillement après 3 et 8 j de maturation (a et b), la longueur des sarcomères (c) et l'indice de fragmentation myofibrillaire (IFM) après 3 et 8 j de maturation (d et e).

NES-N : Aucune stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; NES-L : Aucune stimulation électrique et refroidissement plus lent; ES-N : Stimulation électrique et conditions de refroidissement normales; ES-L : Stimulation électrique et refroidissement plus lent.

5. Discussion

5.1. Chute de la température et du pH des carcasses

La grande proportion de carcasses qui ont présenté un pHu élevé assez important pour avoir un impact sur la couleur de la viande indique que certaines de nos pratiques préabattage ne sont pas optimales en regard de la qualité de la viande. La période de jeûne, la durée du transport et les diverses manipulations précédant l'abattage (chargement et déchargement, tonte…) pourraient être à l'origine de ces pHu élevés puisqu'il est bien connu que les évènements stressants réduisent les réserves de glycogène nécessaires à la chute normale du pH. Une investigation plus poussée serait indiquée afin de chiffrer l'importance de ce problème dans l'industrie ovine québécoise, puisque ce dernier n'a jamais été rapporté auparavant.

La stimulation électrique a permis d'épuiser les réserves d'ATP et d'abaisser le pH d'une manière comparable à l'étude de Pouliot et al. (2012) réalisée avec le même système de stimulation. Toutefois, la durée de stimulation a dû être réduite à 30 sec dans la présente étude, puisque les 60 sec utilisées précédemment produisaient une chute trop importante cette fois-ci. Cette différence de réponse au traitement pourrait être attribuable à la génétique ou à des facteurs préabattage (alimentation, jeûne, transport) qui ont différé entre les deux études. Cette modification dans le protocole de stimulation démontre les risques de l'implantation de cette technologie sans un suivi rigoureux et toute l'importance d'adapter les protocoles en fonction des mesures de températures et pH prises à l'abattoir. Pearce et al. (2010) ont observé une variation des réglages et conditions optimales pour l'utilisation d'un système à voltage moyen entre les dates d'utilisation et les abattoirs. Ils recommandent que les réglages soient déterminés pour chaque abattoir et que des tests à l'interne soient menés sur une base régulière afin d'utiliser la stimulation électrique de manière optimale.

En ce qui a trait à l'abaissement plus rapide du pH entre 2 et 12 h observé chez les carcasses soumises au refroidissement lent, en comparaison avec les carcasses

refroidies normalement, serait dû à une glycolyse plus rapide sous des températures plus chaudes (Marsh 1954; Jeacocke 1977). Ces carcasses étaient effectivement plus chaudes au cours de cette même période postabattage.

La presque totalité des carcasses NES avait un pH supérieur à 6,0, soit en moyenne autour de 6,4-6,5, lorsqu'elles ont passé sous la barre des 10 °C, ce qui indique qu'il restait des quantités significatives d'ATP dans le muscle à une température où la séquestration du calcium est réduite (< 10 °C). Ces carcasses étaient donc susceptibles au phénomène de « cold shortening » (Honikel 2004). Par ailleurs, la stimulation électrique a permis à une majorité de carcasses d'atteindre le pH 6,0 à une température supérieure à 10 °C, ce qui devrait avoir limité le phénomène de « cold shortening ». Des résultats comparables à ceux rapportés par Pouliot et al. (2012). Toutefois, le ralentissement de la vitesse de refroidissement combiné à la stimulation électrique, tel qu'étudié ici, n'a pas permis de modifier de façon significative la proportion des carcasses atteignant le pH 6,0 dans la fenêtre de température visée soit entre 18 et 25 °C, contrairement à ce qui était anticipé. Bien qu'il ait permis aux carcasses ES d'atteindre le pH 6,0 à des températures plus élevées que les carcasses refroidies dans les conditions normales, le ralentissement de la vitesse de refroidissement a plutôt causé le dépassement de la fenêtre optimale pour plusieurs carcasses (> 25 °C), et même, celui de la limite du 35 °C. L'atteinte du pH 6,0 à des températures aussi élevées (> 35 °C) peut engendrer des défauts de qualité semblables à la viande décrite comme PSE (« Pale, Soft and Exudative »; Simmons *et al.* 2008) et altérer la maturation de la viande en causant l'autolyse des calpaïnes (Simmons *et al.* 1996; Hwang et Thompson 2001b). Ces carcasses ont répondu de manière excessive à la stimulation électrique, démontrant une importante chute du pH, et atteignant même le pH 6,0, moins d'une heure suivant l'abattage. Ces résultats démontrent la grande variabilité de réponse à la stimulation électrique entre les individus, ce qui complique l'utilisation de cette technique à grande échelle, du moins avec le système utilisé. Des variations importantes de réponse à la stimulation électrique à bas voltage ont également été rapportées chez

le bœuf (Hollung *et al.* 2007). Ainsi, moins du tiers de nos carcasses ES se sont retrouvées dans la fenêtre de pH-température recommandée (pH 6,0 entre 18 et 25 °C), ce qui est inférieur au 43 % généralement obtenu en Australie avec différents protocoles de stimulation (Pearce *et al.* 2006). Ces résultats sont toutefois comparables au 20 % rapporté par Toohey et al. (2008). Dans leur étude, 68 % des carcasses stimulées ont atteint le pH 6,0 à des températures supérieures ou égales à 18 °C, comparativement à 25 % pour les non stimulés. Dans la présente étude, c'est 62 % des carcasses ES qui ont fait de même, mais aucune carcasse NES n'y est parvenue. Récemment, la fenêtre recommandée par le programme de qualité « Meat Standard Australia » (MSA) a été élargie à 18-35 °C (Pearce *et al.* 2010).

5.2. Qualité de la viande

L'impact de la stimulation électrique sur la couleur qui a été observé dans cette étude concorde avec les résultats obtenus lors d'études précédentes avec le même système (Pouliot *et al.* 2012) et avec des systèmes à haut (Kerth *et al.* 1999) et bas voltage (Warner *et al.* 2005). Ces effets ne sont pas dus au pHu puisque ce dernier était le même pour tous les traitements. L'effet de la stimulation électrique, de même que celui de la maturation, sur la couleur pourrait être causé par une différence de « blooming », un terme utilisé pour décrire le changement de couleur d'un rouge pourpre à un rouge vif suite à l'oxygénation de la myoglobine, pigment responsable de la couleur de la viande. Ce pigment est en compétition avec la respiration cellulaire, toujours active suite à l'abattage, pour l'utilisation de l'oxygène (Young et West 2001). Il a été observé que le taux de consommation d'oxygène diminue durant la maturation (Atkinson 1969; McKenna *et al.* 2005). Le « blooming » serait aussi plus rapide suite à la maturation (Young et West 2001). Il est donc possible que les pièces stimulées et les pièces maturées 8 j aient consommé moins d'oxygène que les pièces NES ou maturées 3 j lors de la période de 30 min d'exposition à l'air (avant la mesure), ce qui aurait favorisé un meilleur « blooming » et engendré les différences de couleur observées. Il est également possible que les différences de couleur soient dues à une certaine dénaturation des protéines, effet physico-chimique causé par la chute du pH à une

température plus élevée, puisque ces différences ont été observées chez les viandes ES et suite à la maturation de 8 j chez les carcasses refroidies lentement, conditions propices pour induire un pH plus bas à une température plus élevée.

L'absence de diminution de perte à la cuisson suite à la maturation est contraire à ce qui a été observé lors d'une précédente étude par la même équipe (Pouliot *et al.* 2012). Les pertes plus importantes reliées à la cuisson au four à convection dans la présente étude sont possiblement venues masquer l'effet minime de la maturation sur la perte à la cuisson préalablement observé.

Les résultats obtenus en ce qui a trait à la tendreté révèlent une importante variation entre les individus, de même qu'entre les journées d'abattage. À cet effet, la stimulation électrique n'a pas permis d'améliorer la tendreté de la viande lors de trois des huit journées d'abattage. En fait, lors de ces trois journées, les moyennes des forces de cisaillement des carcasses NES ont été les plus basses observées au cours de l'étude pour cette catégorie de carcasses, ce qui peut expliquer l'absence apparente d'effet de la stimulation. Il est également difficile d'expliquer l'effet du refroidissement observé lors de trois des huit journées, car lors de ces journées, la viande soumise à un refroidissement rapide était plus tendre que celle soumise à un refroidissement lent. Dans les deux cas, ni l'utilisation de covariables (GR, poids, conformation) ni la chute de la température et du pH des carcasses n'expliquent les différences observées. Cette constatation résulte probablement de la tendreté intrinsèque de la viande attribuable à la génétique et aux conditions préabattage entre les individus (race, mode d'élevage, alimentation, âge, poids, provenance, manipulation, durée du transport et du jeûne…). Malgré tout, la stimulation électrique a globalement permis de produire une viande d'agneau plus tendre, en plus de réduire la variabilité des carcasses en termes de tendreté.

La maturation a amélioré la tendreté de la viande, tel que prévu et rapporté dans de nombreuses publications (Bate-Smith 1948; Whitaker 1959; Devine 2004). Cette amélioration est due à la dégradation des protéines myofibrillaires comme en témoigne l'augmentation de l'indice de fragmentation myofibrillaire, ce qui est également bien reconnu dans le phénomène de maturation (Olson *et al.* 1976). L'amélioration fût plus importante pour les carcasses NES, ce qui peut s'expliquer par le fait que le processus d'attendrissement était moins avancé à 3 j pour la viande NES comparativement à la viande ES. L'écart entre la tendreté à 3 et 8 j est par conséquent plus grand dans le cas de la viande provenant des carcasses NES. En fait, il a été proposé qu'en accélérant l'épuisement des réserves énergétiques, la stimulation électrique engendre une atteinte du *rigor mortis* plus rapide, à des températures plus élevées, ce qui permettrait d'accélérer le processus d'attendrissement de la viande (Simmons *et al.* 2008). L'amélioration légèrement inférieure entre 3 et 8 j chez la viande ES supporte cette idée, de même que la différence d'IFM à 3 et 8 j entre les traitements. La diminution de la différence d'IFM après 8 j de maturation entre les viandes ES et NES pourrait être due à la durée de la maturation puisqu'à ce moment, plus de 80 % de la tendreté se serait développée (Dransfield *et al.* 1981). La variation moins importante de la tendreté à 8 j appuie cette idée. Malgré cela, la combinaison des 8 j de maturation et de la stimulation électrique a permis d'obtenir la viande la plus tendre et en a amélioré l'homogénéité, indiquant que d'autres phénomènes sont impliqués.

Le fait que la longueur des sarcomères ait été plus élevée chez les carcasses stimulées que non stimulées, mais seulement pour les carcasses refroidies plus rapidement, confirme la présence du phénomène de « cold shortening » dans les conditions de refroidissement normales de cet abattoir. Il est toutefois difficile d'expliquer comment le ralentissement de la vitesse de refroidissement a pu engendrer des sarcomères aussi longs chez les carcasses NES-L que chez les ES puisque les données de chute de température et de pH démontrent qu'elles étaient tout autant dans la zone à risque pour le « cold shortening » que les NES-N c'est-à-dire sous les 10 °C, alors qu'il reste

toujours suffisamment d'énergie tel qu'indiqué par un pH > 6,0 (Devine *et al.* 2004; Simmons *et al.* 2008). En fait, le pH de ces carcasses était au-dessus de 6,4 lorsqu'elles ont atteint les 10 °C et le pH 6,0 a été atteint à une température moyenne de 2,5 °C, beaucoup plus bas que ce qui est recommandé (Thompson *et al.* 2005; Pearce *et al.* 2009; Pearce *et al.* 2010). De plus, malgré des sarcomères de longueur équivalente à celle des ES, la tendreté de la viande des carcasses NES-L n'a pas été améliorée. En moyenne les sarcomères étaient courts dans cette étude comparativement à Warner *et al.* (2005) et une importante variation a été observée pour les viandes NES et ES. Une relation curvilinéaire a été observée entre la force de cisaillement et la longueur des sarcomères pour les carcasses NES (R^2 = 0,1869), laquelle était très faible voire inexistante chez les carcasses ES (R^2 = 0,0468; Annexe 1). La viande NES semblait plus tendre lorsque les sarcomères étaient plus petits que 1,53 µm et plus grands que 1,80 µm. Marsh et Leet (1966) ont proposé que la tendreté de la viande n'est pas affectée par un raccourcissement jusqu'à ce que le muscle est perdu 20 % de sa longueur initiale, qu'elle diminue si le raccourcissement se poursuit jusqu'à 40 % de contraction, à partir de quoi elle augmente avec la progression du raccourcissement dû au dommage structural (Marsh *et al.* 1974). Toutefois, leurs données indiquent également que pour une fenêtre de contraction donnée, par exemple 25-35 %, la force de cisaillement peut varier du simple au triple (Marsh et Leet 1966). Les données de la présente étude suggèrent aussi une variation du simple au triple pour des sarcomères dont la longueur variait entre 1,60 et 1,70 µm. Bien qu'il soit généralement accepté que les muscles contractés soient plus durs que les muscles étirés, ces postulats proviennent d'études qui ont comparé une vaste étendue de contraction et d'étirement sur des muscles excisés (Marsh et Leet 1966; Herring *et al.* 1967). Lorsque les muscles sont normalement retenus par le squelette, le raccourcissement pourrait être moins important (Locker 1960; McCrae *et al.* 1971) et avoir des impacts plus complexes et subtils sur la tendreté de la viande. À la même longueur de sarcomères, la viande provenant des carcasses ES étaient plus tendre que celle provenant des carcasses NES, ce qui suggère que l'amélioration de la tendreté suite à la stimulation soit plus complexe

que la simple réduction du « cold shortening ». D'ailleurs, bon nombre de viandes ES avaient des sarcomères dont la longueur correspond à la zone plus dure observée chez la viande NES tout en étant tendre.

Ce constat pourrait en partie s'expliquer par une protéolyse accrue chez la viande provenant des carcasses ES comparativement à la viande NES tel que suggéré par l'IFM. En effet, l'IFM supérieur chez les carcasses soumises à la stimulation électrique témoigne d'une dégradation plus importante de la structure myofibrillaire. Or, il a été démontré que l'attendrissement de la viande est principalement dû à la dégradation de certaines protéines myofibrillaires et du cytosquelette, ce qui a pour effet de fragiliser les fibres musculaires (Koohmaraie 1994; Taylor *et al.* 1995; Hopkins et Taylor 2004). Il semble donc que la stimulation ait accéléré le processus d'attendrissement de la viande, ce qui n'avait pas été observé lors d'une étude précédente utilisant le même système (Pouliot *et al.* 2012). En fait, bien que l'accélération du processus d'attendrissement soit proposée comme conséquence de la stimulation électrique (Hwang *et al.* 2003; Simmons *et al.* 2008), plusieurs études n'ont pas démontré d'effet significatif de ce traitement sur les valeurs d'IFM (Sonaiya *et al.* 1982; Kerth *et al.* 1999; Martin *et al.* 2006; Toohey *et al.* 2008). Par contre, d'autres études ont observé un tel effet (Kadim *et al.* 2009; Abbasvali *et al.* 2012) et il a été montré que la stimulation électrique favorise une dégradation plus rapide de certaines protéines myofibrillaires et du cytosquelette (Uytterhaegen *et al.* 1992; Ho *et al.* 1996). De plus, plusieurs études ont montré que la stimulation électrique a un effet sur l'activité de la µ-calpaïne et de la calpastatine (Dransfield *et al.* 1992a; Uytterhaegen *et al.* 1992; Hwang et Thompson 2001a; Hwang et Thompson 2001b; Li *et al.* 2012), principal système enzymatique responsable de l'attendrissement de la viande (Dransfield 1993; Koohmaraie 1996; Koohmaraie et Geesink 2006), mais les résultats sont souvent contradictoires. La relation pH-température et son effet sur ce système (Dransfield *et al.* 1992a; Dransfield *et al.* 1992b) pourraient bien expliquer cette divergence. Dans le cadre de la présente étude, la stimulation ne semble pas avoir affecté l'activité des calpaïnes, du moins dans les

conditions de refroidissement normal (sous-échantillon sur lequel a porté l'analyse). Par contre, tel que rapporté dans la littérature, l'activité de la μ-calpaïne a décliné de manière importante tandis que la m-calpaïne est demeurée beaucoup plus stable, ne différant qu'à 196 h. Le déclin de l'activité de la μ-calpaïne a toutefois été moins rapide que ce qui est rapporté dans certaines études (Dransfield 1992; Veiseth *et al.* 2001), mais similaire à d'autres (Li *et al.* 2012) effectuées chez l'agneau et le bœuf. Différents facteurs peuvent en partie expliquer cette différence, tels que la durée de congélation avant analyse, l'âge et le génotype de l'animal, le traitement de stimulation et la méthode d'analyse. Dans le cas de l'activité de la caspase 3/7, la différence observée à 1 h *post-mortem* entre les carcasses ES et NES est la première indication que la stimulation peut avoir un effet sur l'activité de cette enzyme. Le déclin observé durant la période *post-mortem* est conforme aux résultats obtenus par d'autres équipes de recherche (Kemp *et al.* 2006; Kemp *et al.* 2009).

Les résultats obtenus au cours de cette étude indiquent que la stimulation électrique améliore la tendreté en réduisant le risque de « cold shortening » (longueur des sarcomères) et en accélérant l'attendrissement de la viande (IFM). Les deux facteurs seraient importants puisqu'aucune amélioration de la tendreté n'a été observée dans le cas des NES-L pour qui la longueur des sarcomères était équivalente au ES, mais l'IFM inférieur.

Dans notre étude, l'absence de relation entre la température à pH 6,0 et la tendreté, la longueur des sarcomères et l'IFM ne supportent pas la recommandation australienne qui suggère de viser à obtenir des carcasses à pH 6,0 à une température entre 18-25 °C (Thompson *et al.* 2005; Pearce *et al.* 2009) ou plus récemment 18-35 °C (Pearce *et al.* 2010). Les données de la présente étude peuvent sembler suggérer qu'il y a une température minimale à pH 6,0 (environ 5 °C) au-delà de laquelle la tendreté est favorisée et que sous cette température, les carcasses sont sujettes au phénomène de « cold shortening » et plus à risque de produire une viande dure (Honikel 2004). Toutefois, on peut remarquer qu'un bon nombre de carcasses ont été en mesure de

produire une viande tendre malgré ces conditions théoriquement défavorables (< 10 °C). De plus, il est évident que la température optimale à pH 6,0 a été fortement influencée par le traitement de stimulation électrique. Il est donc impossible de discerner si la tendreté supérieure lorsque le pH 6,0 est atteint au-delà de 5 °C est réellement due à la température ou plutôt à un effet plus direct de la stimulation sur la maturation ou la structure de la fibre musculaire (Savell *et al.* 1978; Takahashi *et al.* 1984; Takahashi *et al.* 1987). D'ailleurs, puisque la maturation commence au ou près du *rigor mortis* (Devine et Graafhuis 1995), il est surprenant de ne pas avoir observé de relation entre la température à pH 6,0 et l'IFM afin de supporter l'hypothèse que la stimulation électrique accélère la protéolyse en partie grâce aux températures plus élevées (Simmons *et al.* 2008). Par contre, puisque l'IFM était supérieure chez les carcasses ES et qu'elle était négativement corrélée à la force de cisaillement à 3 et 8 j (respectivement -0,36 et -0,28; P < 0,013), il est possible que la stimulation électrique ait favorisé la protéolyse indépendamment de la température, en lui permettant tout simplement de commencer plus tôt ou en favorisant la libération de calcium et l'activation des calpaïnes (Geesink *et al.* 2001).

6. Conclusions

Cette étude n'a pas permis de mettre en place une procédure postabattage (refroidissement et stimulation électrique) permettant à un maximum de carcasses d'atteindre le pH 6,0 entre 18 et 25 °C. En fait, les données n'ont pas démontré que cette fenêtre ou celle élargie jusqu'à 35 °C a une importance significative pour la tendreté de la viande. Une température de la carcasse trop froide à pH 6,0, en deçà de 5 °C, engendre plus de risque de produire une viande dure, mais une partie de la viande demeure tout de même acceptable. La stimulation électrique a permis de produire une viande plus tendre, et ce plus rapidement. Ce traitement améliore la tendreté de la viande en réduisant le risque de « cold shortening » et en accélérant la protéolyse. Ces deux facteurs semblent agir parallèlement et contribuer au développement de la tendreté. Par contre, la variabilité de la réponse à la stimulation en termes de pH, mais

également de tendreté, de longueur des sarcomères et d'IFM souligne qu'il est primordial de déterminer les paramètres optimaux avant l'utilisation de cette technologie à plus grande échelle et d'effectuer un suivi régulier suite à son implantation. De plus, indépendamment du traitement, la variabilité observée démontre toute l'importance des facteurs intrinsèques à l'animal et des conditions préabattage pour la tendreté du produit final.

7. Références

Abbasvali, M., Shekarforoush, S.S., Aminlari, M. et Ebrahimnejad, H. 2012. Effects of medium-voltage electrical stimulation on postmortem changes in fat-tailed sheep. J. Food Sci. 77: S47-S53.

Agence canadienne d'inspection des aliments. 2009. Manuel de méthodes de l'hygiène des viandes. [En ligne]. Disponible à l'adresse: http://www.inspection.gc.ca/francais/fssa/meavia/man/manf.shtml (Page consultée le 2 novembre 2009).

Agriculture Canada. 1992. Règlement sur la classification des carcasses de bétail et de volaille (DORS/92-541). Gazette du Canada, Partie II 126: 3848.

Atkinson, J.J. 1969. Post-mortem changes in the oxygen uptake and NAD content of lamb muscularis semimembranosus. Nature 223: 1372-1373.

Bate-Smith, E.C. 1948. The physiology and chemistry of rigor mortis, with special reference to the aging of beef. Adv. Food Res. 1: 1.

Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal. Biochem. 72: 248-254.

Comité recherche et santé du CEPOQ. 2010. Besoins et opportunités de recherche en production ovine. 2010-2014. CEPOQ [En ligne]. Disponible à l'adresse: http://www.cepoq.com/admin/useruploads/files/besoins_et_opportunites_de_recherches.pdf (Page consultée le 5 juin 2012).

Culler, R.D., Parrish, F.C., Smith, G.C. et Cross, H.R. 1978. Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemical, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle. J. Food Sci. 43: 1177-1180.

Devine, C.E. 2004. Conversion of muscle to meat : Ageing. Pages 330-338 *dans* Encyclopedia of meat sciences. W. Jensen, C. Devine and M. Dikeman (éds.). Elsevier Academic Press, Oxford, UK.

Devine, C.E. et Graafhuis, A.E. 1995. The basal toughness of unaged lamb. Meat Sci. 39: 285-291.

Devine, C.E., Hopkins, D.L., Hwang, I.H., Ferguson, D.M. et Richards, I. 2004. Electrical stimulation. Pages 413-423 *dans* Encyclopedia of Meat Sciences. W. Jensen, C. Devine and M. Dikeman (éds.). Elsevier Academic Press, Oxford, UK.

Dransfield, E. 1992. Modelling post-mortem tenderisation-III: Role of calpain I in conditioning. Meat Sci. 31: 85-94.

Dransfield, E. 1993. Modelling post-mortem tenderisation-IV: Role of calpains and calpastatin in conditioning. Meat Sci. 34: 217-234.

Dransfield, E., Etherington, D.J. et Taylor, M.A.J. 1992a. Modelling post-mortem tenderisation - II: Enzyme changes during storage of electrically stimulated and non-stimulated beef. Meat Sci. 31: 75-84.

Dransfield, E., Jones, R.C.D. et MacFie, H.J.H. 1981. Tenderising in M. longissimus dorsi of beef, veal, rabbit, lamb and pork. Meat Sci. 5: 139-147.

Dransfield, E., Wakefield, D.K. et Parkman, I.D. 1992b. Modelling post-mortem tenderisation - I: Texture of electrically stimulated and non-stimulated beef. Meat Sci. 31: 57-73.

Geesink, G.H., Taylor, R.G., Bekhit, A.E.D. et Bickerstaffe, R. 2001. Evidence against the non-enzymatic calcium theory of tenderization. Meat Sci. 59: 417-422.

Gornall, A.G., Bardawill, J. et David, M.M. 1949. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. J. Biol. Chem. 177: 751-766.

Herring, H.K., Cassens, R.G., Suess, G.G., Brungardt, V.H. et Briskey, E.J. 1967. Tenderness and associated characteristics of stretched and contracted bovine muscles. J. Food Sci. 32: 317-323.

Ho, C.Y., Stromer, M.H. et Robson, R.M. 1996. Effect of electrical stimulation on postmortem titin, nebulin, desmin, and troponin-T degradation and ultrastructural changes in bovine longissimus muscle. J. Anim. Sci. 74: 1563-1575.

Hollung, K., Veiseth, E., Froystein, T., Aass, L., Langsrud, O. et Hildrum, K.I. 2007. Variation in the response to manipulation of post-mortem glycolysis in beef muscles by low-voltage electrical stimulation and conditioning temperature. Meat Sci. 77: 372-383.

Honikel, K.O. 2004. Conversion of muscle to meat : Cold and heat shortening. Pages 318-323 *dans* Encyclopedia of meat sciences. W. Jensen, C. Devine and M. Dikeman (éds.). Elsevier Academic Press, Oxford, UK.

Hopkins, D.L., Littlefield, P.J. et Thompson, J.M. 2000. A research note on factors affecting the determination of myofibrillar fragmentation. Meat Sci. 56: 19-22.

Hopkins, D.L. et Taylor, R.G. 2004. Post-mortem muscle proteolysis and meat tenderness. Pages 363-388 *dans* Muscle Development of Livestock Animals : Physiology, Genetics and Meat Quality. M. F. W. te Pas, M. E. Everts and H. P. Haagsman (éds.). CABI publishing, Wallingfrod, UK.

Hopkins, D.L., Toohey, E.S., Pearce, K.L. et Richards, I. 2008. Some important changes in the Australian sheep meat processing industry. Aust. J. Exp. Agric. 48: 752-756.

Hwang, I.H., Devine, C.E. et Hopkins, D.L. 2003. The biochemical and physical effects of electrical stimulation on beef and sheep meat tenderness. Meat Sci. 65: 677-691.

Hwang, I.H. et Thompson, J.M. 2001a. The effect of time and type of electrical stimulation on the calpain system and meat tenderness in beef longissimus dorsi muscle. Meat Sci. 58: 135-144.

Hwang, I.H. et Thompson, J.M. 2001b. The interaction between pH and temperature decline early postmortem on the calpain system and objective tenderness in electrically stimulated beef *longissimus dorsi* muscle. Meat Sci. 58: 167-174.

Jeacocke, R.E. 1977. The temperature dependence of anaerobic glycolysis in beef muscle held in a linear temperature gradient. J. Sci. Food Agric. 28: 551-556.

Kadim, I.T., Mahgoub, O., Al-Marzooqi, W., Khalaf, S., Al-Sinawi, S.S.H. et Al-Amri, I.S. 2009. Effects of transportation during the hot season and low voltage electrical stimulation on histochemical and meat quality characteristics of sheep longissimus muscle. Livest. Sci. 126: 154-161.

Kemp, C.M., Bardsley, R.G. et Parr, T. 2006. Changes in caspase activity during the postmortem conditioning period and its relationship to shear force in porcine longissimus muscle. J. Anim. Sci. 84: 2841-2846.

Kemp, C.M., King, D.A., Shackelford, S.D., Wheeler, T.L. et Koohmaraie, M. 2009. The caspase proteolytic system in callipyge and normal lambs in longissimus, semimembranosus, and infraspinatus muscles during postmortem storage. J. Anim. Sci. 87: 2943-2951.

Kerth, C.R., Cain, T.L., Jackson, S.P., Ramsey, C.B. et Miller, M.F. 1999. Electrical stimulation effects on tenderness of five muscles from Hampshire × Rambouillet crossbred lambs with the callipyge phenotype. J. Anim. Sci. 77: 2951-2955.

Koohmaraie, M. 1994. Muscle proteinases and meat aging. Meat Sci. 36: 93-104.

Koohmaraie, M. 1996. Biochemical factors regulating the toughening and tenderization processes of meat. Meat Sci. 43: S193-S201.

Koohmaraie, M. et Geesink, G.H. 2006. Contribution of postmortem muscle biochemistry to the delivery of consistent meat quality with particular focus on the calpain system. Meat Sci. 74: 34-43.

Li, C.B., Li, J., Zhou, G.H., Lametsch, R., Ertbjerg, P., Brüggemann, D.A., Huang, H.G., Karlsson, A.H., Hviid, M. et Lundström, K. 2012. Electrical stimulation affects metabolic enzyme phosphorylation, protease activation, and meat tenderization in beef. J. Anim. Sci. 90: 1638-1649.

Locker, R.H. 1960. Degree of muscular contraction as a factor in tenderness of beef. J. Food Sci. 25: 304-307.

Marsh, B.B. 1954. Rigor mortis in beef. J. Sci. Food Agric. 5: 70-75.

Marsh, B.B. et Leet, N.G. 1966. Studies in meat tenderness. III. The effects of cold shortening on tenderness. J. Food Sci. 31: 450-459.

Marsh, B.B., Leet, N.G. et Dickson, M.R. 1974. The ultrastructure and tenderness of highly cold-shortened muscle. Int. J. Food Sci. Technol. 9: 141-147.

McCrae, S.E., Seccombe, C.G., Marsh, B.B. et Carse, W.A. 1971. Studies in meat tenderness. 9. The tenderness of various lamb muscles in relation to their skeletal restraint and delay before freezing. J. Food Sci. 36: 566-570.

McKenna, D.R., Mies, P.D., Baird, B.E., Pfeiffer, K.D., Ellebracht, J.W. et Savell, J.W. 2005. Biochemical and physical factors affecting discoloration characteristics of 19 bovine muscles. Meat Sci. 70: 665-682.

Olson, D.G., Parrish, F.C. et Stromer, M.H. 1976. Myofibril fragmentation and shear resistance of three bovine muscles during postmortem storage. J. Food Sci. 41: 1036-1041.

Pearce, K.L., Hopkins, D.L., Toohey, E., Pethick, D.W. et Richards, I. 2006. Quantifying the rate of pH and temperature decline in lamb carcasses using medium voltage electrical stimulation in an Australian abattoir. Aust. J. Exp. Agric. 46: 869-874.

Pearce, K.L., Hopkins, D.L., Williams, A., Jacob, R.H., Pethick, D.W. et Phillips, J.K. 2009. Alternating frequency to increase the response to stimulation from medium voltage electrical stimulation and the effect on objective meat quality. Meat Sci. 81: 188-195.

Pearce, K.L., Van de Ven, R., Mudford, C., Warner, R.D., Hocking Edwards, J., Jacob, R.H., Pethick, D.W. et Hopkins, D.L. 2010. Case studies demonstrating the benefits on pH and temperature decline of optimising medium-voltage electrical stimulation of lamb carcasses. Anim. Prod. Sci. 50: 1107-1114.

Pearson, A.M. et Young, R.B. 1989. Muscle and meat biochemistry. Academic press, San Diego, CA, 457 p.

Pouliot, E., Gariépy, C., Thériault, M., Avezard, C., Fortin, J., Simmons, N.J. et Castonguay, F.W. 2012. Effects of low-voltage electrical stimulation and aging on lamb meat quality. Can. J. Anim. Sci. 92: 59-66.

Pouliot, É., Gariépy, C., Thériault, M. et Castonguay, F.W. 2009. Évaluation de pratiques postabattage sur la qualité de la viande d'agneau du Québec Rapport de recherche remis au Conseil pour le développement de l'agriculture. Juin 2009, 39 p.

Raser, K.J., Posner, A. et Wang, K.K. 1995. Casein zymography: a method to study mu-calpain, m-calpain, and their inhibitory agents. Arch. Biochem. Biophys. 319: 211-216.

Sañudo, C., Sanchez, A. et Alfonso, M. 1998. Small ruminant production systems and factors affecting lamb meat quality. Meat Sci. 49: s29-s64.

Savell, J.W., Dutson, T.R., Smith, G.C. et Carpenter, Z.L. 1978. Structural changes in electrically stimulated beef muscle. J. Food Sci. 43: 1606-1607.

Simmons, N.J., Daly, C.C., Cummings, T.L., Morgan, S.K., Johnson, N.V. et Lombard, A. 2008. Reassessing the principles of electrical stimulation. Meat Sci. 80: 110-122.

Simmons, N.J., Singh, K., Dobbie, P. et Devine, C.E. 1996. The effect of prerigor holding temperature on calpain and calpastatin activity and meat tenderness. Pages 414-415 *dans* 42nd International Congress of Meat Science and Technology, Lillehammer, Norway.

Takahashi, G., Lochnert, J.V. et Marsh, B.B. 1984. Effects of low-frequency electrical stimulation on beef tenderness. Meat Sci. 11: 207-225.

Takahashi, G., Wang, S.-M., Lochner, J.V. et Marsh, B.B. 1987. Effects of 2-Hz and 60-Hz electrical stimulation on the microstructure of beef. Meat Sci. 19: 65-76.

Taylor, R.G., Geesink, G.H., Thompson, V.F., Koohmaraie, M. et Goll, D.E. 1995. Is Z-disc degradation responsible for postmortem tenderization. J. Anim. Sci. 73: 1351-1367.

Thompson, J.M., Hopkins, D.L., D'Souza, D.N., Walker, P.J., Baud, S.R. et Pethick, D.W. 2005. The impact of processing on sensory and objective measurements of sheep meat eating quality. Aust. J. Exp. Agric. 45: 561-573.

Toohey, E.S., Hopkins, D.L., Stanley, D.F. et Nielsen, S.G. 2008. The impact of new generation pre-dressing medium-voltage electrical stimulation on tenderness and colour stability in lamb meat. Meat Sci. 79: 683-691.

Uytterhaegen, L., Claeys, E. et Demeyer, D. 1992. The effect of electrical stimulation on beef tenderness, protease activity and myofibrillar fragmentation. Biochimie 74: 275-281.

Veiseth, E., Shackelford, S.D., Wheeler, T.L. et Koohmaraie, M. 2001. Effect of postmortem storage on u-calpain and m-calpain in ovine skeletal muscle. J. Anim. Sci. 79: 1502-1508.

Warner, R.D., Ferguson, D.M., McDonagh, M.B., Channon, H.A., Cottrell, J.J. et Dunshea, F.R. 2005. Acute exercise stress and electrical stimulation influence the consumer perception of sheep meat. Aust. J. Exp. Agric. 45: 553-560.

Whitaker, J.R. 1959. Chemical changes associated with aging of meat with emphasis on the proteins. Adv. Food Res. 9: 1.

Young, O.A. et West, J. 2001. Meat Color. Pages 39-70 *dans* Meat Science and Applications. O. A. Young, R. W. Rogers, Y. H. Hui and W.-K. Nip (éds.). CRC Press, Boca Raton, FL.

Zins Beauchesne et associés. 2010. Plan stratégique 2010-2015 pour le secteur ovin du Québec. Fédération des producteurs d'agneaux et moutons du Québec [En ligne]. Disponible à l'adresse: http://www.agneauduquebec.com/FPAMQ/upload/pdf/projet/Plan_strategique_2010-2015_Industrie_ovine_Quebec.pdf (Page consultée le 6 juin 2012).

Annexe 1.

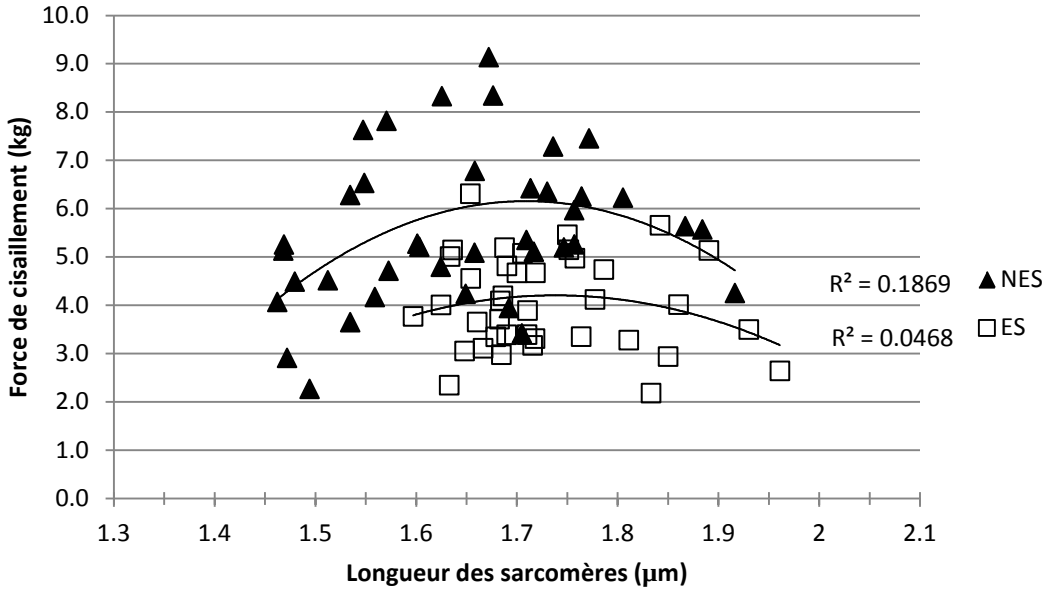

Figure A.1. Relation entre la force de cisaillement à 3 j et la longueur des sarcomères pour de la viande (LD) provenant de carcasses stimulées (ES) ou non (NES).