

RAPPORT FINAL

Projet #6125

Requérant :

Centre d'expertise en
production ovine du
Québec

Rédigé par :

Éric Pouliot,
Université Laval

François Castonguay,
Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Mireille Thériault,
Agriculture et
Agroalimentaire Canada

*Projet réalisé dans le
cadre du programme*

Recherche appliquée,
innovation et transfert
technologique du Conseil
pour le développement
de l'agriculture du
Québec (CDAQ)

Évaluation de Pratiques Postabattages

sur la Qualité de la Viande d'Agneau du Québec

Juin 2009

Évaluation de Pratiques Post-abattages sur la Qualité de la Viande d'Agneau du Québec

Rédigé par Éric Pouliot, Mireille Thériault et François Castonguay

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

Cette publication se trouve aussi en version électronique sur le Web à l'adresse suivante : www.ovins.fsaa.ulaval.ca

Pour plus de renseignements :

François Castonguay, Ph. D.
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Centre de recherche et de développement sur les bovins laitiers et le porc de Lennoxville
En poste au Département des Sciences Animales
Pavillon Paul-Comtois, Université Laval
Québec, Québec G1V 0A6
Tél. : (418) 656-2131 poste 8358
Courrier électronique : Francois.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 le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) pour le financement du projet. La compagnie Agribands Purina Canada Inc. (Jérôme Richard) a également participé financièrement à la réussite de cette recherche en fournissant la moulée distribuée aux agneaux. Agriculture et Agroalimentaire Canada et le Centre d'expertise en production ovine du Québec (CEPOQ) ont 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.

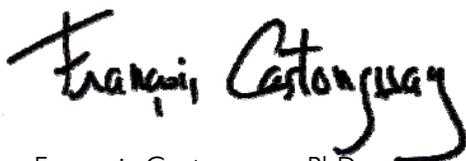
Je tiens à remercier très sincèrement Éric Pouliot, étudiant au 3^e cycle au Département des sciences animales de l'Université Laval qui a participé à la rédaction des protocoles et a assuré leur exécution en bergerie, à l'abattoir et en laboratoire. Il a également réalisé la compilation et l'analyse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

Du côté de nos collaborateurs du CEPOQ, je tiens à remercier Hélène Méthot, coordonnatrice des projets de R&D, qui a mis à notre disposition l'argent et les ressources nécessaires à la modification des installations selon les exigences particulières de l'expérience. Merci à Sylvain Blanchette, gérant de la ferme de recherche au CEPOQ, et à toute son équipe qui ont collaboré à la réalisation du protocole à la station de testage.

Du côté de mon équipe de recherche, je veux remercier Mireille Thériault, adjointe de recherche à Agriculture et Agroalimentaire Canada, 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 bergerie et en abattoir, à l'analyse statistique des résultats et à la rédaction du rapport.

Merci également à Catherine Avezard, technicienne de laboratoire au CRDA, pour son soutien et ses conseils techniques. Merci à Jacinthe Fortin et à toute son équipe pour l'évaluation sensorielle au CRDA. Merci aux gens de l'abattoir Luceville inc. qui ont bien voulu participer au projet. Leur compréhension et leur patience nous ont permis de mener à bien ce projet. Merci à Christian Bernier et Marie-Claude Parisé, propriétaires de Sélection Berarc, d'avoir facilité la disposition des carcasses des agneaux. Des remerciements s'adressent finalement à Steve Méthot, statisticien à Agriculture et Agroalimentaire Canada, et à Claude Laberge, conseiller en statistiques chez Expert Conseil Statex, pour leurs conseils lors de la réalisation des analyses statistiques.

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!



François Castonguay, PhD

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES FIGURES	VII
1. RÉSUMÉ	8
2. PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1. Introduction.....	9
2.2. Conditions d'abattage actuelles au Québec.....	9
2.3. Période de maturation actuelle au Québec	9
2.4. Connaissances actuelles sur la stimulation électrique.....	10
2.4.1. Prévention du « cold shortening ».....	10
2.4.2. Altération physique des fibres musculaires	11
2.4.3. Impact sur la protéolyse	11
2.4.4. Importance majeure du couplage pH-température	12
2.4.5. Impacts sur les autres paramètres de qualité	12
2.4.6. Différentes méthodes de stimulation	13
2.5. Conclusion.....	14
3. OBJECTIFS DU PROJET	14
3.1. Généraux.....	14
3.2. Spécifiques.....	14
4. PROTOCOLE DE RECHERCHE.....	15
4.1. Expérience préliminaire.....	15
4.2. Expérience principale.....	15
4.2.1. Phase animale	15
4.2.2. Abattage, traitements postabattages et échantillonnage	16
4.2.3. Analyses de laboratoire.....	17
4.2.4. Données compilées	18
4.2.5. Analyse statistique	19
4.2.6. Étapes de réalisation	20
5. RÉSULTATS ET DISCUSSION	21

5.1. Expérience préliminaire.....	21
5.2. Expérience principale.....	27
5.2.1. Suivi de croissance et abattage.....	27
5.2.2. Chute de température et de pH.....	27
5.2.3. Impact des traitements postabattages sur la qualité de la viande	30
6. CONCLUSION ET IMPACTS DE L'ÉTUDE	35
7. DIFFUSION DES RÉSULTATS	35
8. RÉFÉRENCES.....	35
9. PLAN DE FINANCEMENT ET RAPPORT FINANCIER.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Performances de croissance et qualité des carcasses des agneaux utilisés pour les traitements postabattages.....	27
Tableau 2. Couleur et perte en eau des <i>longissimus dorsi</i> provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique	30
Tableau 3. Paramètres reliés à la tendreté des <i>longissimus dorsi</i> provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique (S) et maturées (M) 1, 3 ou 8 j (T1, T3 et T8)	33
Tableau 4. Analyse sensorielle des <i>longissimus dorsi</i> provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique (S) et maturées (M) 1, 3 ou 8 j (T1, T3 et T8)	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Luceville à Sainte-Luce (Expérience préliminaire 1)	22
Figure 2.	Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Luceville à Sainte-Luce (Expérience préliminaire 2)	23
Figure 3.	Chute du pH et de la température d'un échantillon de 9 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri (Expérience préliminaire 3)	24
Figure 4.	Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri (Expérience préliminaire 4)	25
Figure 5.	Chute du pH et de la température d'un échantillon de 19 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Forget à Terrebonne (Expérience préliminaire 5)	26
Figure 6.	Chute du pH et de la température de carcasses d'agneaux stimulées ---◆--- ou non (témoins) —■— en fonction du temps <i>post-mortem</i> (n=38/traitement)	29
Figure 7.	Suivi des activités du système calpaïnes-calpastatine durant le premier 24 h <i>post-mortem</i> des <i>longissimus dorsi</i> provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique	34

1. RÉSUMÉ

Les conditions postabattages jouent un rôle crucial dans la qualité de la viande. Un refroidissement trop rapide des carcasses d'agneaux ou une maturation inadéquate peuvent affecter la qualité de la viande, particulièrement la tendreté. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de la stimulation électrique et de la maturation sur la qualité de la viande d'agneaux lourds du Québec. Pour ce faire, 76 agneaux mâles demi-sang Suffolk ont été abattus à un poids moyen de 49,5 kg. Trente-huit carcasses ont été stimulées électriquement dix minutes *post-mortem* à l'aide d'un système commercial de stimulation à bas voltage (21 V; 0,25 A; 60 sec; Jarvis, Model ES-4, Middletown, CT, É.U.) tandis qu'aucun traitement particulier n'a été appliqué aux 38 autres carcasses. Durant les premières 24 h de refroidissement, la température des carcasses et la chute du pH ont été mesurées sur le *longissimus dorsi* (LD) et des échantillons ont été prélevés à des fins d'essais enzymatiques. Suite à la découpe des carcasses, des périodes de maturation de 1, 3 ou 8 jours ont été attribuées aléatoirement à trois sections du LD pour chacune des carcasses. Le pH ultime (48 h), la couleur (L^* , a^* et b^*), la perte en eau, la perte à la cuisson, la force de cisaillement, la longueur des sarcomères, l'indice de fragmentation myofibrillaire (IFM), l'activité du système calpaïnes-calpastatine ainsi que la qualité sensorielle ont été déterminés.

La chute de la température a été la même pour les carcasses non stimulées et stimulées. Par contre, la stimulation électrique a engendré un pH inférieur des carcasses tout au long de la période *pré-rigor* (0-24 h; $P < 0,001$), sans toutefois affecter le pH ultime (48 h). La stimulation électrique et la maturation ont amélioré la tendreté de la viande déterminée par la force de cisaillement et par l'analyse sensorielle ($P < 0,001$). Pour les trois temps de maturation, la tendreté a été supérieure pour la viande provenant de carcasses stimulées et seulement 3 j de maturation ont permis à cette viande d'atteindre le même degré de tendreté que la viande de carcasses non stimulées maturées 8 j. L'amélioration de la tendreté suite à la stimulation serait en grande partie due à la longueur supérieure des sarcomères dans cette viande ($P < 0,001$) puisque ni l'IFM, ni l'activité des calpaïnes et de la calpastatine n'ont été affectées par le traitement. Dans le cas de la maturation, l'amélioration serait plutôt due à la protéolyse comme en témoignent l'activité des calpaïnes ($P < 0,001$) et l'IFM ($P < 0,001$). En ce qui a trait aux autres paramètres de qualité, la stimulation a affecté les paramètres de couleur ($P < 0,01$) en plus de réduire l'intensité de la flaveur ($P = 0,04$). Ces résultats apportent une évidence que la stimulation électrique peut améliorer la tendreté des carcasses d'agneau au Québec, principalement en réduisant la contraction due au froid.

2. PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Introduction

Pour répondre à la demande de viande d'agneau en émergence, satisfaire les désirs des consommateurs, mieux se positionner en tant que produit haut de gamme sur les marchés et ainsi demeurer compétitif, il importe d'évaluer et de mettre au point des pratiques qui permettront d'optimiser la qualité de l'agneau produit au Québec. Parmi tous les facteurs pouvant influencer la qualité organoleptique de la viande d'agneau, ceux reliés aux procédés postabattages sont reconnus pour être les plus importants, d'abord de par leur niveau d'influence (Sanudo et al., 1998), mais aussi en raison de leur position-clé dans la chaîne de production (passage obligé de l'ensemble des agneaux commerciaux et maillon plus facilement contrôlable en raison du petit nombre d'abattoirs comparé au nombre d'éleveurs).

2.2. Conditions d'abattage actuelles au Québec

Au Québec, les agneaux sont abattus dans quelques abattoirs non spécialisés. Ainsi, les chambres de refroidissement et les systèmes employés sont plutôt conçus pour refroidir efficacement des carcasses de bœufs et/ou de porcs afin d'assurer une qualité microbiologique élevée. Cependant, puisque les carcasses d'agneaux sont plus petites, elles disposent d'un plus grand rapport surface/volume, ce qui favorise les échanges thermiques et permet un refroidissement significativement plus rapide. Or, il est généralement admis qu'un refroidissement trop rapide des carcasses occasionne une contraction du muscle engendré par le froid, mieux connu sous le nom de « cold shortening » (Honikel, 2004; Lawrie, 1998). Essentiellement, le « cold shortening » est causé par une baisse trop rapide de la température des carcasses, ce qui réduit le transport actif nécessaire à la séquestration du calcium intracellulaire alors que les réserves énergétiques des cellules musculaires (niveaux d'ATP) sont encore élevées. Comme chez les animaux vivants, cette présence simultanée de calcium et d'ATP favorise la contraction musculaire, donc un raccourcissement des fibres, et cause une importante diminution de la tendreté (Pearson and Young, 1989). Et plus ce rétrécissement par le froid est important, plus la tendreté sera affectée négativement (Bouton et al., 1973; Locker and Hagyard, 1963; Marsh and Leet, 1966).

Les muscles de l'espèce ovine sont particulièrement sensibles à ce phénomène de « cold shortening » en raison de la proportion très élevée des fibres oxydatives composant ces muscles (Pearson and Young, 1989). Étant donné la susceptibilité de l'agneau à ce phénomène et les conditions de refroidissement des carcasses ovines dans les abattoirs québécois, le risque est élevé que la tendreté ne soit pas optimale ou, du moins, pas très homogène au Québec. Toutefois, jusqu'à maintenant, aucune étude n'a été menée au Québec afin de connaître l'importance de ce phénomène. L'enjeu n'en demeure pas moins stratégique considérant que la tendreté est le critère de qualité le plus important pour le consommateur de viande (Miller et al., 2001; Touraille, 1994).

2.3. Période de maturation actuelle au Québec

De nos jours, 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. En effet, les coupes de viande des différentes espèces se retrouvent très rapidement dans les comptoirs de vente ou chez les restaurateurs. Toutefois, certains restaurants, certaines boucheries et même certains distributeurs (Cargill avec le programme Angus Pride ou Métro avec le bœuf GrillRouge

Angus) en reconnaissent l'importance et accordent une période de maturation de manière à favoriser la tendreté de leur produit. Il est depuis longtemps reconnu que la viande subit d'importants changements durant les jours suivants le *rigor mortis* (rigidité cadavérique suite à l'épuisement des réserves énergétiques) (Bate-Smith, 1948; Davey and Dickson, 1970; Davey and Gilbert, 1968; Whitaker, 1959). Bien que la maturation semble aussi influencer plusieurs paramètres de qualité sensorielle (couleur, jutosité et flaveur), l'attendrissement de la viande est, sans aucun doute, l'effet le plus bénéfique de ce processus (Devine, 2004). L'activité protéolytique, c.-à-d. la dégradation des structures musculaires par les différentes enzymes, explique une grande partie des changements qui surviennent durant cette période et qui mènent à l'attendrissement de la viande (Dransfield, 1992a, b; Koohmaraie, 1996).

Pour l'agneau du Québec, la maturation n'est pas une pratique répandue. Toutefois, il y a certaines exceptions, notamment l'agneau de Charlevoix dont le cahier de charge exige une maturation d'au moins huit jours. Or, la rapidité avec laquelle la majorité de la viande d'agneau du Québec se retrouve disponible pour la vente et la consommation ne lui permet pas d'atteindre son plein potentiel d'attendrissement. Chez l'agneau, l'impact de la maturation sur la tendreté serait significatif. En effet, il serait possible de gagner jusqu'à 3 points d'amélioration de la tendreté, sur une échelle de 8 (1 étant une viande dure et 8 une viande tendre; panel de dégustation) (Dransfield et al., 1981) ou encore, de réduire de 4 kg les forces de cisaillement (mesure objective de la tendreté) (Koohmaraie et al., 1991a) et ce, à condition que le refroidissement n'ait pas provoqué de contraction musculaire susceptible de réduire la tendreté. Selon Dransfield et al. (1981), la durée nécessaire pour obtenir 80 % de l'attendrissement maximal de la viande est de 7,7 jours chez l'agneau.

2.4. Connaissances actuelles sur la stimulation électrique

En cherchant à développer des techniques simples, rapides et efficaces pour améliorer la tendreté des viandes, les chercheurs ont découvert que la stimulation électrique des carcasses était un moyen fort intéressant d'y parvenir. En effet, l'application d'un courant électrique à une carcasse provoque des contractions musculaires qui engendrent une chute rapide du pH due à l'utilisation des réserves énergétiques en anaérobiose (Devine et al., 2006; Hwang et al., 2003). Cette chute de pH plus hâtive permet d'accélérer l'atteinte du *rigor mortis*, et conséquemment de réduire les risques de « cold shortening », en plus de devancer la période d'attendrissement (Simmons et al., 2008). Bien que la technique soit connue depuis plus de 50 ans, on observe, dans la littérature, une grande variation des réponses, notamment en fonction des diverses conditions d'expérimentation (Chrystall and Devine, 1985). En fait, il semble que les mécanismes impliqués dans l'amélioration de la tendreté lors de la stimulation électrique ne soient pas complètement élucidés (Hwang et al., 2003). L'impact de la stimulation électrique pourrait être dû à la prévention du « cold shortening », à l'altération physique des fibres musculaires et/ou à un effet sur la protéolyse musculaire.

2.4.1. Prévention du « cold shortening »

Au cours des années 70, la stimulation électrique a été utilisée en Nouvelle-Zélande afin de prévenir le « cold shortening » des carcasses refroidies extrêmement rapidement à des fins d'exportation (Chrystall and Devine, 1985; Simmons et al., 2008). L'accélération de la glycolyse engendrée par ce traitement permet d'épuiser une bonne partie des réserves énergétiques, ce qui se traduit par la chute rapide du pH. De cette manière, lorsque la carcasse atteint une température ne permettant plus une séquestration adéquate du calcium, les réserves énergétiques sont déjà trop faibles pour causer une contraction musculaire. Il a été montré à plusieurs reprises que, sous des conditions de refroidissement rapide, la longueur des sarcomères (unité de la fibre musculaire) est supérieure chez les carcasses

stimulées comparativement aux carcasses non stimulées et que la viande provenant de ces carcasses stimulées est également plus tendre (Chrystall and Hagyard, 1976; Cross, 1979). Ce constat est logique puisque la tendreté de la viande augmente avec la longueur des sarcomères (Bouton et al., 1973; Marsh and Leet, 1966). De manière générale, il est admis que les carcasses ne doivent pas atteindre une température inférieure à 10 °C avant que le pH ne soit de 6 unités (Devine et al., 2004; Simmons et al., 2008). Diverses études ont démontré que la stimulation électrique a également un impact sur la tendreté lorsque les conditions ne favorisent pas la contraction due au froid (Devine et al., 2006; Uytterhaegen et al., 1992). D'autres facteurs sont donc impliqués afin d'expliquer l'impact de la stimulation électrique sur la tendreté.

2.4.2. Altération physique des fibres musculaires

Outre son impact bénéfique dans la prévention du raccourcissement musculaire dû au froid, la stimulation électrique engendrerait une altération physique des fibres musculaires. En effet, des zones de contractions et d'étirements ont été observées sur des myofibrilles suite à l'application d'un traitement de stimulation électrique (Ho et al., 1996; Takahashi et al., 1984; Takahashi et al., 1987). De plus, des fractures de certaines structures des myofibrilles ont également été notées (Ho et al., 1996; Takahashi et al., 1984). Il semble donc y avoir une altération physique des fibres suite à la stimulation électrique. Toutefois, il n'a pas été possible, jusqu'à maintenant, de comprendre si cette altération influence directement la tendreté de la viande ou bien si elle favorise l'action des enzymes en facilitant leur accès aux substrats (Devine et al., 2004; Hwang et al., 2003). Ces zones de contractions et d'étirements seraient le résultat de super-contractions localisées, provoquées par un relâchement important du calcium, également reconnu pour activer la protéolyse musculaire (Hwang et al., 2003). Il est donc difficile de définir le rôle exact de l'altération physique.

2.4.3. Impact sur la protéolyse

La stimulation électrique pourrait également avoir un impact sur la tendreté de la viande en influençant la protéolyse. En accélérant la chute du pH, la stimulation électrique permettrait au muscle d'atteindre le *rigor mortis* plus rapidement. Comme la maturation de la viande semble débiter près du *rigor mortis*, le processus d'attendrissement serait devancé pour les carcasses stimulées (Simmons et al., 2008). De plus, le *rigor mortis* serait atteint à une température supérieure, ce qui favoriserait l'activité des systèmes enzymatiques et causerait un attendrissement plus rapide de la viande (Devine et al., 2006; Hwang and Thompson, 2001a; Morton et al., 1999).

Il a été montré que la stimulation électrique favorise une dégradation plus rapide de certaines protéines myofibrillaires et du cytosquelette (Ho et al., 1996; Uytterhaegen et al., 1992). Or, l'attendrissement normal de la viande au cours de la maturation est principalement dû à la dégradation de ces protéines qui a pour effet de fragiliser les fibres musculaires (Hopkins and Taylor, 2004; Koohmaraie, 1994; Taylor et al., 1995). De nombreuses évidences indiquent que cette protéolyse est principalement de nature enzymatique et que le système calpaïnes-calpastatine joue un rôle primordial (Dransfield, 1993; Geesink et al., 2006; Koohmaraie, 1994). Il a été suggéré que la stimulation électrique puisse influencer l'activité du système calpaïnes-calpastatine via une augmentation du calcium sarcoplasmique et/ou via les conditions de pH et de température qu'elle engendre (Hwang et al., 2003).

Il est intéressant de noter que la protéolyse est plus rapide dans les muscles dont la glycolyse est rapide (O'Halloran et al., 1997a; O'Halloran et al., 1997b) et que l'activité de la μ -calpaïne y est plus importante tandis que celle de la calpastatine (inhibiteur des calpaïnes) y est réduite (O'Halloran et al., 1997b; Ouali and Talmant, 1990; Sazili et al., 2005). Or, comme la stimulation induit une glycolyse plus rapide, elle pourrait donc agir sur l'activité de ces enzymes. 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; Hwang and Thompson, 2001a; Hwang and Thompson, 2001b; Uytterhaegen et al., 1992). Par contre, ces résultats sont souvent contradictoires puisque pour certains, l'activité de la μ -calpaïne est favorisée tandis que pour d'autres elle diminue rapidement suite au traitement (Hwang and Thompson, 2001a; Lee et al., 2000; Uytterhaegen et al., 1992). Ces divergences sont probablement le résultat de chutes de pH et de température très différentes qui affectent l'activité de ce système. En effet, les conditions de pH et de température sont très importantes pour l'activité des calpaïnes (Dransfield et al., 1992a; Dransfield et al., 1992b). Si le pH chute trop rapidement et que la température est toujours élevée, il y aura une diminution rapide de l'activité de la μ -calpaïne, ce qui produira une viande plus dure (Hwang et al., 2003). Par contre, lorsque la stimulation est adéquate, l'activité sera importante et la viande s'attendrira plus rapidement.

D'ailleurs, selon Shaw et al. (2005), la stimulation produit, suite à une maturation de cinq jours, une viande de tendreté équivalente à celle non stimulée, maturée pendant dix jours. D'autres études ont aussi démontré que la stimulation électrique améliore la tendreté suite à une période de maturation aussi courte que deux jours (Polidori et al., 1999; Shaw et al., 2005), ce qui correspond relativement bien au temps requis pour que l'agneau du Québec atteigne le comptoir des détaillants.

2.4.4. Importance majeure du couplage pH-température

Le pH et la température ont un impact sur plusieurs paramètres susceptibles d'influer sur la tendreté tels que le « cold shortening », la protéolyse et la dénaturation des protéines. Le contrôle de leur chute représente donc une opportunité intéressante afin d'optimiser la qualité de la viande produite, et ce, pour divers marchés (Simmons et al., 2006). En effet, les conditions requises en terme de pH et de température seront différentes selon le marché pour lequel la viande est destinée, que ce soit la congélation, la consommation rapide sur le marché local ou bien l'exportation sous forme fraîche (Simmons et al., 2006; Thompson et al., 2005). En Australie, le programme « Sheep Meat Eating Quality » recommande que le pH 6 soit atteint entre 18 et 25 °C, ce qui permet d'obtenir une tendreté optimale de la viande (Thompson et al., 2005). Lorsque le pH 6 est atteint à ces températures, le « cold shortening » est évité et l'attendrissement est favorisé. Toutefois, le suivi de carcasses d'agneaux dans trois abattoirs australiens durant 12 mois a montré que seulement 18,8 % des carcasses se retrouvent à pH 6 dans cette fenêtre de température (Toohey et al., 2006). La stimulation électrique est une procédure standard lors de l'abattage des bovins et ovins en Australie et en Nouvelle-Zélande et elle a maintenant pour objectif de permettre à un maximum de carcasses d'atteindre le pH 6 entre 18 et 25 °C (Pearce et al., 2009; Simmons et al., 2008). En Australie, l'utilisation d'un système de stimulation à moyen voltage permet à 60 % (Pearce et al., 2006) et 67 % (Toohey et al., 2008) des carcasses d'atteindre cet objectif.

2.4.5. Impacts sur les autres paramètres de qualité

Puisqu'elle a un impact sur le couple pH-température, la stimulation électrique est susceptible d'influencer plusieurs paramètres de qualité de la viande. Une stimulation trop importante peut causer une chute rapide du pH alors que la température est élevée et ainsi produire une viande dont les caractéristiques se rapprochent de la viande PSE (Simmons et al., 2008). En effet, sous de telles conditions de pH et de température, il peut y avoir une dénaturation des protéines qui cause une augmentation des pertes en eau et qui produit une viande de couleur plus claire (Offer, 1991; Penny, 1977). Il s'agit bien sûr de conditions extrêmes qui ne sont normalement pas rencontrées lorsque la stimulation permet une chute du pH et de la température adéquate. Toutefois, il arrive tout de même dans des conditions moins extrêmes que la stimulation cause une augmentation de la perte en eau

(den Hertog-Meischke et al., 1997) et de la perte à la cuisson (Lewis and Babiker, 1983), bien que ce ne soit pas toujours le cas (Wiklund et al., 2008). La stimulation peut aussi avoir un impact sur la couleur de la viande due à une meilleure oxygénation de la surface de la viande lors de la prise de mesure (Simmons et al., 2008). Certaines études ont d'ailleurs observé une viande d'agneau plus claire et rouge de même qu'une augmentation des paramètres de couleur L* (luminosité), a* (vert-rouge) et b* (bleu-jaune) suite à la stimulation (Kerth et al., 1999; King et al., 2004; Roeber et al., 2000). Il est toutefois difficile de tirer des généralités quant à l'effet de la stimulation sur la jutosité, la couleur et la flaveur, puisque les résultats sont variables d'une étude à l'autre. Par exemple, Shaw et al. (2005) ont montré que la jutosité, la couleur et la flaveur peuvent effectivement être influencées par la stimulation électrique alors que les résultats obtenus par Hopkins et al. (2005) n'ont pas permis de corroborer cette information.

2.4.6. Différentes méthodes de stimulation

Lorsqu'il est question de stimulation électrique, de nombreux paramètres peuvent varier d'un système à l'autre, notamment la tension électrique, l'intensité du courant, la fréquence et la largeur d'impulsion (pour revues voir Devine et al., 2004; Simmons et al., 2008; Simmons et al., 2006). Historiquement, c'est la tension qui a reçu le plus d'attention. Des systèmes à haut et à bas voltages ont d'abord fait leur apparition. Lorsque la stimulation à bas voltage est utilisée (normalement ≤ 100 V), elle doit être appliquée rapidement suite à la mort de l'animal puisque le système nerveux doit être fonctionnel pour que ce type de stimulation soit efficace (Morton and Newbold, 1982). Cette dernière a l'avantage de ne pas être dangereuse pour l'utilisateur. Par contre, le pH mesuré immédiatement après la stimulation et sa chute subséquente sont variables (Simmons et al., 2008). À l'opposé, la stimulation à haut voltage (jusqu'à 1143 V) peut être appliquée plus tard sur la chaîne d'abattage puisque son action passe par l'induction directe de la dépolarisation membranaire (Morton and Newbold, 1982). La tension utilisée est toutefois potentiellement mortelle pour les travailleurs qui emploient l'appareil. Une zone de protection entre le travailleur et l'aire de stimulation des carcasses doit être aménagée. La chute du pH est plutôt constante entre les carcasses, par contre le risque de trop stimuler (pH trop faible alors que la température est élevée) est important (Simmons et al., 2008). En Australie, un système à moyen voltage a récemment été développé afin de pouvoir stimuler les carcasses en fin de chaîne tout en étant sécuritaire pour les employés (Pearce et al., 2006; Shaw et al., 2005). Ce système à intensité constante modifie la tension qu'il génère en fonction de la résistance de chacune des carcasses (Pearce et al., 2006). Différentes largeurs d'impulsion et intensités de courant ont été testées afin d'optimiser ce système (Pearce et al., 2006) puisque l'intensité du courant peut avoir un impact sur la réponse des carcasses à la stimulation. Si la stimulation est appliquée rapidement suivant la mort de l'animal, 50 mA suffiront à induire des contractions musculaires et l'intensité de contraction ne sera que très peu influencée par l'intensité du courant (Simmons et al., 2008). Au contraire, si la stimulation est appliquée avant l'entrée en chambre froide, la réponse dépendra fortement de l'intensité du courant (Simmons et al., 2008). Jusqu'à maintenant, les meilleurs résultats ont été obtenus avec ce système lorsque l'intensité était de 1 A, la largeur d'impulsion de 2,5 ms et la fréquence de 15 Hz (Pearce et al., 2006; Pearce et al., 2009). C'est d'ailleurs sous une fréquence comprise entre 9 et 16 Hz que la chute du pH serait la plus importante suite à une stimulation électrique (Devine et al., 2004). De nombreux systèmes emploient une fréquence de 15 Hz. En augmentant la fréquence, on diminue l'intervalle entre les pulsations. Si la fréquence devient trop élevée, cet intervalle est plus court que le temps nécessaire au tissu pour sortir de sa phase réfractaire (Simmons et al., 2006). Le tissu ne peut donc plus répondre à cette élévation de la fréquence.

Finalement, il a été montré que sous les mêmes conditions de stimulation, les carcasses peuvent réagir différemment au traitement en terme de contraction et de chute du pH en raison de différences de taille et de caractéristiques métaboliques des fibres musculaires qui les composent (Simmons et al., 2008). Afin de contrer ce problème, le système de stimulation nommé « Smart Stimulation » a été mis au point. Ce système tient compte de la chute réelle du pH des carcasses et ajuste la stimulation en conséquence afin d'atteindre le pH désiré (Simmons et al., 2006).

2.5. Conclusion

La période postabattage est donc un point critique pour la qualité de la viande dans son ensemble, mais particulièrement pour la tendreté, caractéristique pour laquelle le consommateur est prêt à payer davantage et qui a le plus d'influence sur l'habitude d'achat. Il est possible que les pratiques actuelles en abattoir (refroidissement rapide et absence de maturation) ne favorisent pas l'expression du plein potentiel de tendreté de l'agneau du Québec. La stimulation électrique des carcasses pourrait s'avérer la technologie la plus susceptible d'amener une plus grande homogénéité de la tendreté voire même améliorer l'ensemble des paramètres organoleptiques. La grande majorité des informations sur les effets de la stimulation électrique nous viennent cependant de la Nouvelle-Zélande et de l'Australie, où les agneaux produits sont bien différents, en terme d'âge et de poids, tout comme les régimes de refroidissement (abattoirs spécialisés pour les ovins, refroidissement ultrarapide). Il était donc important de valider les impacts de cette technologie dans notre contexte (agneaux de 4-6 mois et de plus de 36 kg), afin de savoir si elle peut être un outil approprié aidant à garantir un produit homogène en tendreté et de qualité supérieure. Enfin, il était nécessaire de déterminer l'effet de ces techniques sur les autres paramètres de qualité telle la flaveur, paramètre particulièrement important chez l'agneau.

3. OBJECTIFS DU PROJET

3.1. Généraux

- ❑ Déterminer si les pratiques postabattages actuelles en abattoir permettent à l'agneau du Québec d'exprimer son plein potentiel en matière de qualité organoleptique;
- ❑ Développer des outils permettant à l'industrie ovine québécoise de positionner son produit en tant que viande de qualité supérieure et, ainsi, demeurer compétitive.

3.2. Spécifiques

- ❑ Déterminer si la vitesse de refroidissement des carcasses d'agneaux observée dans certains abattoirs du Québec peut les rendre susceptibles au phénomène de raccourcissement dû au froid (« cold shortening »);
- ❑ Définir l'impact de la stimulation électrique sur les différents paramètres de qualité organoleptique, mais plus particulièrement sur la tendreté de l'agneau du Québec;
- ❑ Caractériser l'effet de la maturation de la viande sur les propriétés organoleptiques, notamment la tendreté de l'agneau du Québec;
- ❑ Établir la meilleure combinaison de ces pratiques postabattages en vue d'une application adaptée aux réalités de l'industrie québécoise.

4. PROTOCOLE DE RECHERCHE

4.1. Expérience préliminaire

Pour tracer un portrait des effets potentiels des systèmes de refroidissement dans les abattoirs d'agneaux, trois abattoirs importants dans le secteur (abattoir Luceville à Sainte-Luce, abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri et abattoir Forget à Terrebonne) ont été visités et un suivi de la chute de température et du pH des carcasses y a été effectué. Pour ce faire, le pH (pH mètre 200 series pH meter, Beckman Instruments, inc., CA, É.U. muni d'une sonde Mettler-Toledo LoT406-M6-DXK-S7/25, Mettler Toledo Ingold inc., Bedford, MA, É.U.) et la température du *longissimus dorsi* (LD) ont été mesurés à différents temps *post-mortem* directement sur les carcasses.

4.2. Expérience principale

4.2.1. Phase animale

Sélection et formation des groupes

Pour l'expérience principale sur les effets de la stimulation électrique et de la maturation des carcasses, un total de 90 agneaux mâles issus de béliers Suffolk (SU) et de brebis de type prolifique (Arcott Rideau - RI - ou $\frac{1}{2}$ Dorset $\frac{1}{2}$ Romanov - DPRV) ont été choisis vers 60 jours, chez neuf producteurs commerciaux du Québec. Ainsi, 40 agneaux $\frac{1}{2}$ SU $\frac{1}{2}$ RI et 50 agneaux $\frac{1}{2}$ SU $\frac{1}{4}$ DP $\frac{1}{4}$ RV ont été regroupés à la station d'évaluation des agneaux du Centre d'expertise en production ovine du Québec (CEPOQ) à La Pocatière.

À leur entrée en station, les agneaux ont été vermifugés (Ivomec, Merial; 0,5 ml/tête) et vaccinés (Covexin 8, Schering-Plough Animal Health Corporation; 4 ml/tête). De la vitamine E et du sélénium (Dystocel, Pfizer; 0,5 ml/tête) ainsi qu'une dose d'antibiotique longue action (Tetraject LA 200, Bimeda-MTC; 2,5 ml/tête) leurs ont été administrés. Les agneaux ont été gardés en groupes selon leur ferme d'origine dans 11 parquets avec une densité minimale de 1,27 m²/agneau.

Période de croissance et abattage

Les agneaux ont reçu, à volonté, un foin de deuxième coupe (principalement mil et brome) et une moulée de croissance cubée dosant 16 % (EM : 2,50 Mcal/kg, ADF : 11 % et PB : 16 %) jusqu'au poids fixé pour l'abattage, soit 48-52 kg (à jeun). Les agneaux ont été pesés chaque semaine, de leur entrée en station jusqu'à ce que le poids d'abattage désiré soit atteint. Les agneaux ont été mis à jeun environ 18 h avant l'abattage, tout en ayant accès à de l'eau.

Sur les 90 agneaux entrés en station, deux sont morts pendant la période de croissance et deux autres ont été retirés parce qu'ils n'avaient pas le potentiel de se rendre au poids d'abattage. Un autre a été éliminé parce qu'il a atteint le poids d'abattage rapidement et qu'il n'était pas possible d'avoir un autre agneau comme témoin pour cette semaine d'abattage. Au cours de la période de croissance, neuf agneaux se sont révélés être d'un génotype autre que ceux recherchés. Cette situation a fait que, finalement, 76 agneaux (30 agneaux $\frac{1}{2}$ SU $\frac{1}{2}$ RI et 46 agneaux $\frac{1}{2}$ SU $\frac{1}{4}$ DP $\frac{1}{4}$ RV) ont été retenus pour participer au reste de l'étude.

4.2.2. Abattage, traitements postabattages et échantillonnage

Les abattages se sont déroulés sur huit semaines et chaque semaine, un nombre à peu près égal (± 1 animal) de carcasses ont été stimulées ou ont servi de témoins (non stimulées) de façon à contrôler l'effet potentiel de la semaine d'abattage sur les résultats des traitements.

Abattage et stimulation électrique

L'abattage a eu lieu dans un abattoir commercial (Abattoir Luceville inc., Sainte-Luce). À l'abattage, les agneaux ont subi un étourdissement électrique avant d'être saignés. La moitié des carcasses ont été soumises à un traitement de stimulation électrique tandis que l'autre moitié constituait le groupe témoin non stimulé. Le traitement a été appliqué après le sectionnement de la veine jugulaire, dans les 10 min suivant la fin de la saignée. La stimulation électrique consistait en un traitement de 60 secondes appliqué à l'aide d'un appareil industriel à bas voltage (21 V; 0,25 A, Jarvis, Modèle ES-4, Middletown, Connecticut, É.U.) et utilisé selon la procédure du fabricant. Par la suite, les agneaux ont été éviscérés. Chacune des carcasses a été pesée à chaud et ensuite placée dans la salle de refroidissement à une température de 4 °C. Le délai entre l'abattage et l'entrée dans la chambre de refroidissement était d'environ 20-25 min.

Mesures et échantillonnage pendant le refroidissement

Les vitesses de refroidissement des carcasses et de chute du pH ont été mesurées. Pour ce faire, le pH (pH mètre 200 series pH meter, Beckman Instruments, inc, CA, É.U. muni d'une sonde Mettler-Toledo LoT406-M6-DXK-S7/25, Mettler Toledo Ingold inc., Bedford, MA, É.U.) et la température du *longissimus dorsi* (LD) ont été mesurés à 0,75, 3, 6, 12 et 24 h *post-mortem*.

Des échantillons d'environ 7-8 g du LD ont également été prélevés au niveau du carré gauche à 0,75, 3, 6, 12 et 24 h suivant l'abattage. Ces échantillons ont été découpés en petits cubes, congelés dans l'azote liquide et placés dans la glace sèche. Ils ont ensuite été conservés à -80 °C jusqu'aux analyses enzymatiques.

Vingt-quatre heures après l'abattage, les carcasses ont été pesées (poids froid) et classifiées selon la méthode d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (1992) par le classificateur de la Fédération des producteurs d'agneaux et de moutons du Québec.

Découpe et échantillonnage

Le jour suivant l'abattage (24 h *post-mortem*), les deux longes primaires complètes ont été récupérées sur chaque carcasse. Les longes ont par la suite été divisées pour obtenir deux carrés et deux longes courtes par animal. Le carré gauche, grandement échantillonné durant les premières 24 h, n'a été attribué à aucun temps de maturation. Les trois autres pièces ont été attribuées aléatoirement à l'un des trois temps de maturation, soit 1, 3 et 8 jours (T1, T3 et T8).

Une tranche de viande a été prise sur chacune des trois pièces après quoi, les pièces et les tranches ont été identifiées (numéro de l'individu et temps de maturation), emballées individuellement sous vide et placées à 4 °C. Une fois le temps de maturation atteint, soit au jour 1, 3 ou 8 postabattage, les pièces ont été congelées à -20 °C. À la fin de tous les abattages, les pièces congelées ont été transportées par camion réfrigéré jusqu'au Centre de recherches et développement sur les aliments (CRDA) à St-Hyacinthe pour les analyses. Les pièces ont été utilisées pour les mesures de force de cisaillement et l'analyse sensorielle tandis que les tranches ont servi à la détermination de l'indice de fragmentation myofibrillaire. Les tranches soumises au temps de maturation T1 ont également servi à la détermination de la longueur des sarcomères.

4.2.3. Analyses de laboratoire

Les analyses de laboratoire ont été réalisées au Centre de recherche et de développement sur les aliments (CRDA) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Saint-Hyacinthe et au Département des sciences animales de l'Université Laval à Québec.

PH ultime, couleur et perte en eau

Le pH ultime et la couleur de la viande du LD ont été déterminés 48 h suivant l'abattage sur les carrés gauches. Afin d'exposer une partie de l'œil de longe à l'air (30 min d'oxygénation), une tranche de viande a été découpée. À l'aide d'un colorimètre (Chroma meter CR-300 et Data processor DP-301, Minolta Co., Ltd., Japon) les paramètres a^* , b^* et L^* ont été déterminés en triplicata sur la face du carré nouvellement exposée à l'air.

Les tranches découpées précédemment ont ensuite été dépouillées du gras et du tissu conjonctif visibles avant d'être pesées, accrochées à un hameçon, suspendues dans un bac et conservées pendant 48 h à 4 °C. Après cette période, les tranches ont été pesées de nouveau afin de déterminer, par différence de poids, la perte en eau.

Force de cisaillement et perte à la cuisson

La perte à la cuisson ainsi que la force de cisaillement ont été mesurées au cours de la même manipulation sur les pièces soumises aux différents temps de maturation (T1; T3 et T8), et ce, pour un sous-échantillon de 20 carcasses ayant reçu le traitement de stimulation électrique et de 20 carcasses non stimulées. Pour leur décongélation, les pièces ont été placées dans une chambre à 2 °C pour une période de 48 h. 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. Les longes ont été pesées, emballées individuellement sous vide et cuites à l'autoclave (Autoclave Pilot Rotor 900, Herman Stock Maschinenfabrik GmbH, Neumunster, Allemagne). La cuisson a été arrêtée à une température interne de 68 °C. Une fois cuite, la viande a été entreposée à 4 °C jusqu'au lendemain. Deux heures avant d'être pesée de nouveau, la viande a été placée à la température de la pièce. La perte 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 cm² de longueur plus ou moins variable (environ 5 cm). De 9 à 18 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) avant 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.

Qualité sensorielle

La qualité sensorielle a été évaluée par un panel de dégustation préalablement entraîné. Dans ce test, 12 juges ont évalué l'intensité de la flaveur, de la jutosité et de la fermeté pour chaque échantillon présenté selon des échelles de 0 à 7. Un sous échantillon de 36 carcasses (18 stimulées et 18 témoins) a été utilisé. À chacune des six séances, les juges ont reçu six échantillons, soit un échantillon stimulé et un témoin pour chacun des trois temps de maturation. Le même juge a reçu les trois temps de maturation d'une même carcasse (stimulée et témoin). Puisqu'il était impossible de servir 12 juges avec les échantillons d'une seule carcasse, trois carcasses par traitement ont été utilisés lors de chaque test et chaque carcasse a été évaluée par 4 juges.

Activités enzymatiques

L'activité des enzymes responsables de l'attendrissement de la viande (calpaïnes et calpastatines) a été déterminée sur les échantillons recueillis à l'abattoir durant les premières 24 h *post-mortem* (0,75, 3, 6, 12 et 24 h). Un sous-échantillon de 10 carcasses stimulées et 10 non stimulées a été analysé. L'activité de la μ -calpaïne et de la m-calpaïne a été déterminée selon la méthode d'Iversen *et al.* (1993). La séparation de ces deux enzymes a été effectuée à l'aide d'un chromatographe (FPLC Waters 650E, Waters, divisions de Millipor, Milford, MA, É.U.) muni d'un système de distribution multisolvant (Waters 600E, Waters, divisions de Millipor, Milford, MA, É.U.). La calpastatine a été isolée selon l'approche de Koohmaraie (1990) adaptée par Shackelford *et al.* (1994). L'activité caséinolytique des enzymes a été mesurée par spectrophotométrie.

Indice de fragmentation myofibrillaire (IFM)

La fragmentation myofibrillaire a été mesurée sur les tranches de viande soumises à 1, 3 et 8 j de maturation sur le même sous-échantillon que celui utilisé pour la détermination des forces de cisaillement (20 carcasses stimulées et 20 non stimulées). Pour ce faire, 5 g de muscle ont été homogénéisés dans 20 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) pendant 60 sec à une vitesse maximale de 26 000 rpm (Polytron PT 3100, Kinematica, Luzernerstrasse, Lucerne, Suisse). La densité optique de l'échantillon a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre (Varian Cary 50, Varian Instruments, Walnut Creek, CA, É.U.) sous une longueur d'onde de 540 nm. Par la suite, la concentration protéique a été déterminée par la méthode Bradford (1976) en utilisant le même spectrophotomètre à une longueur d'onde de 595 nm. L'équation suivante a été utilisée afin d'obtenir une valeur arbitraire de IFM :

$$IFM = \frac{DO_{540nm} \times 150 \times 0.5}{[protéique]}$$

Longueur des sarcomères

La longueur des sarcomères a été déterminée à partir des tranches soumises à 1 j de maturation pour un sous-échantillon de 15 carcasses de chaque traitement. Pour ce faire, 5 g de muscle ont été homogénéisés dans 50 ml d'une solution de sucrose 0,2 M pendant 25 sec à une vitesse maximale de 26 000 rpm (Polytron PT 3100, Kinematica, Luzernerstrasse, Lucerne, Suisse). Par la suite, une goutte de la solution obtenue a été déposée sur une lame et recouverte d'une lamelle. À l'aide d'un microscope à contraste de phase (Nikon Eclipse E400, Nikon Canada instruments Inc., Mississauga, ON, Canada) muni d'une caméra digitale (modèle 3.2.0, Diagnostic Instruments inc., Sterling Heights, MI, É.U.), 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 Image Pro Plus (MediaCybernetics, Silver Spring, MD, É.U.).

4.2.4. Données compilées

En bergerie

- Poids à l'entrée;
- Poids vif avant le jeûne;
- Poids d'abattage à jeun;
- Âge à l'abattage;
- Gain moyen quotidien.

À l'abattoir

- Poids de la carcasse chaude;
- Rendement carcasse;
- Classification (GR et cotes de conformation);
- Vitesse de refroidissement;
- Vitesse de chute du pH;
- Température à pH 6,0;
- pH ultime.

Au laboratoire

- Coloration (L^* , a^* et b^*);
- Perte en eau;
- Perte à la cuisson;
- Force de cisaillement;
- Longueur des sarcomères;
- Indice de fragmentation myofibrillaire;
- Activités enzymatiques (calpaines et calpastatines).

Panel de dégustation

- Tendreté;
- Jutosité;
- Intensité de la flaveur;

4.2.5. Analyse statistique

Les données ont été analysées selon la procédure Mixed de SAS (SAS Institute Inc., 2001). Pour la force de cisaillement, l'IFM, la perte à la cuisson, et l'analyse sensorielle (fermeté, jutosité et flaveur), le traitement (non stimulées ou stimulées), la maturation (1, 3 ou 8 jours) et l'interaction ont été inclus comme effets fixes dans le modèle tandis que le jour d'abattage a été considéré comme effet aléatoire. L'effet de la maturation sur ces variables a été évalué en mesures répétées, puisque les trois temps de maturation 1, 3 et 8 j ont été attribués à trois sections du LD de chaque carcasse. Pour le pH, la température et l'activité du système calpaines-calpastatine, le traitement (non stimulées ou stimulées), le temps *post-mortem* (0,75, 3, 6, 12 et 24 h) et l'interaction ont été inclus comme effets fixes dans le modèle tandis que le jour d'abattage a été considéré comme effet aléatoire. Le temps *post-mortem* a été considéré comme une mesure répétée. Finalement, pour les paramètres de couleurs (L^* , a^* et b^*) et pour la perte en eau, seul le traitement (non stimulées ou stimulées) a été inclus comme effet fixe dans le modèle tandis que le jour d'abattage a été considéré comme effet aléatoire.

4.2.6. Étapes de réalisation

Activités	Durée Prévue (début-fin)	Date Réelle (début-fin)	Finalités	Notes
- Revue de littérature sur la stimulation et la maturation;	Novembre 2006 à février 2007	Novembre 2006 à février 2007	Recueillir l'information nécessaire à l'application du traitement (stimulation électrique des carcasses)	
- Rencontre avec les principaux intervenants dans l'abattage d'agneaux; - Prise de données de température des carcasses dans quelques abattoirs;	Février 2007	Février à avril 2007	Prendre connaissance des conditions d'abattage actuelles et choix de l'abattoir « partenaire », c.-à-d. Abattoir Luceville	
- Naissance des agneaux chez les producteurs impliqués;	Janvier 2007	Janvier 2007		
- Sevrage et sélection des agneaux pour le projet;	Mi-mars 2007	Mi-mars 2007	Produire les agneaux pour obtenir le matériel (viande) nécessaire à l'expérimentation	
- Entrée en station (CEPOQ) et période de croissance;	Fin mars 2007	Fin mars 2007		
- Pratiques pour le début des abattages;	Avril 2007	Avril 2007		
- Abattages; - Traitements de stimulation et maturation; - Mesures et prélèvements à l'abattoir;	Mai à juin 2007	Mai à juillet 2007	Traitements, prises des mesures en abattoir et échantillonnages	La période réelle d'abattage dépendait uniquement de la croissance des agneaux
- Analyses de laboratoire;	Juin 2007 à juin 2008	Août 2007 à décembre 2008	Déterminer l'effet des traitements sur les paramètres de qualité organoleptique de la viande	Les analyses ont débuté plus tard que prévu et ont pris plus de temps
- Compilation des données; - Analyses statistiques; - Rédaction et remise du rapport;	Juin à décembre 2008	Février à juin 2009	Analyses des résultats et production du rapport de recherche	Retard dû au changement d'échéancier des analyses de laboratoire

Activités	Durée Prévue (début-fin)	Date Réelle (début-fin)	Finalités	Notes
<ul style="list-style-type: none"> - Présentation d'un affiche au congrès de l'ASAS à Montréal; - Conférence au Symposium ovin 2009 - Rédaction de l'article scientifique et de l'article de vulgarisation. 	Novembre à décembre 2008	15 juil 2009 18 sept 2009 Déc 2009	Diffuser les résultats	La diffusion va bientôt commencer. Le Symposium Ovin 2009 sera une tribune très importante puisqu'un très grand nombre d'acteurs de l'industrie y seront.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1. Expérience préliminaire

Au cours de la phase préliminaire de ce projet, trois abattoirs ont été visités afin de mesurer les chutes du pH et de la température des carcasses d'agneaux qui y sont abattus. À l'abattoir Luceville inc. à Sainte-Luce, les mesures ont été effectuées dans les heures suivant l'abattage sur 12 carcasses, et ce, à deux occasions (expérience préliminaire 1 réalisée le 20 février 2007; expérience préliminaire 2 réalisée le 21 février 2007). À l'abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri, deux groupes de 9 et 12 carcasses ont été suivis les 13 février et 22 février 2007 (expériences préliminaires 3 et 4, respectivement). Finalement, le 17 avril 2007, un groupe de 12 carcasses a été suivi à l'abattoir Forget de Terrebonne (expérience préliminaire 5).

Les résultats (Figures 1 à 5) montrent que le refroidissement des carcasses est très rapide dans les trois abattoirs. Lors de quatre des cinq expériences préliminaires réalisées (1, 2, 4 et 5), les carcasses ont atteint une température inférieure à 10 °C alors que le pH était toujours supérieur à 6,2. Or, il a été démontré que sous ces conditions, les carcasses d'agneaux sont susceptibles à la contracture au froid. Il est donc probable que la qualité organoleptique, principalement la tendreté, des carcasses soumises à ces conditions ne soit pas optimale. Ce constat semble s'appliquer aux trois abattoirs visités qui présentent des patrons de refroidissement des carcasses assez similaires. Ces résultats supportent l'hypothèse de départ et confirment la pertinence de ce projet.

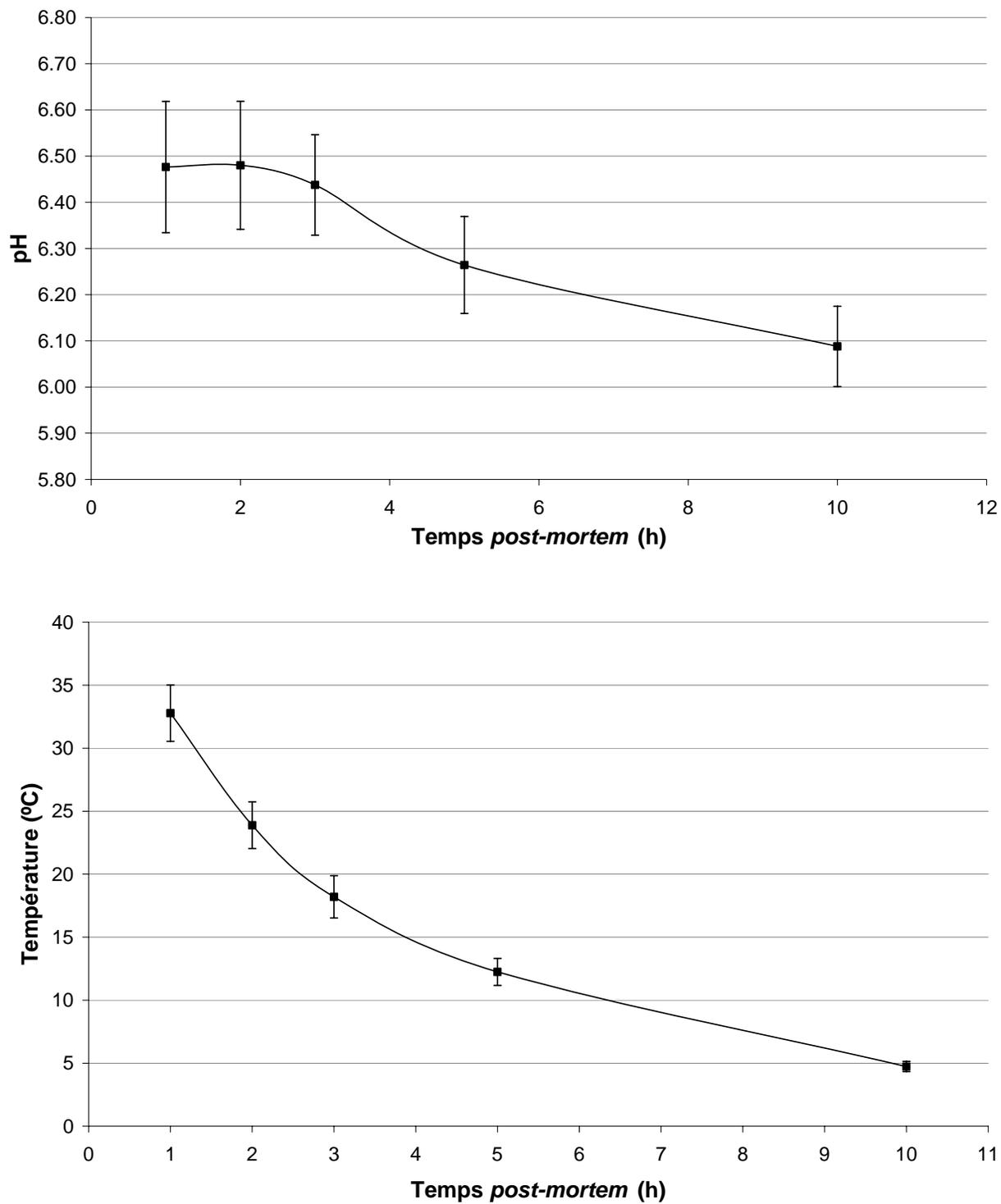


Figure 1. Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Luceville à Sainte-Luce (Expérience préliminaire 1)

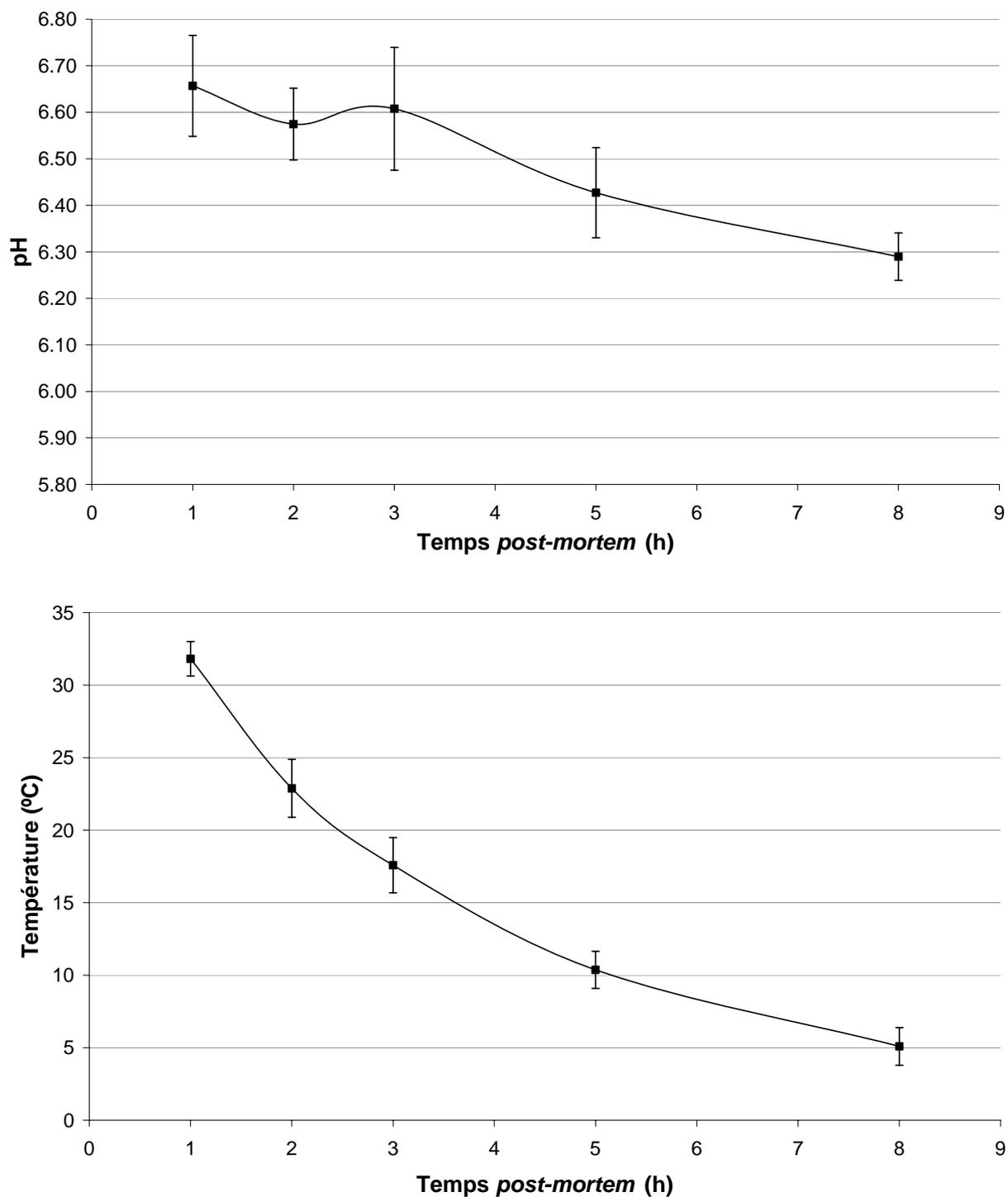


Figure 2. Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Luceville à Sainte-Luce (Expérience préliminaire 2)

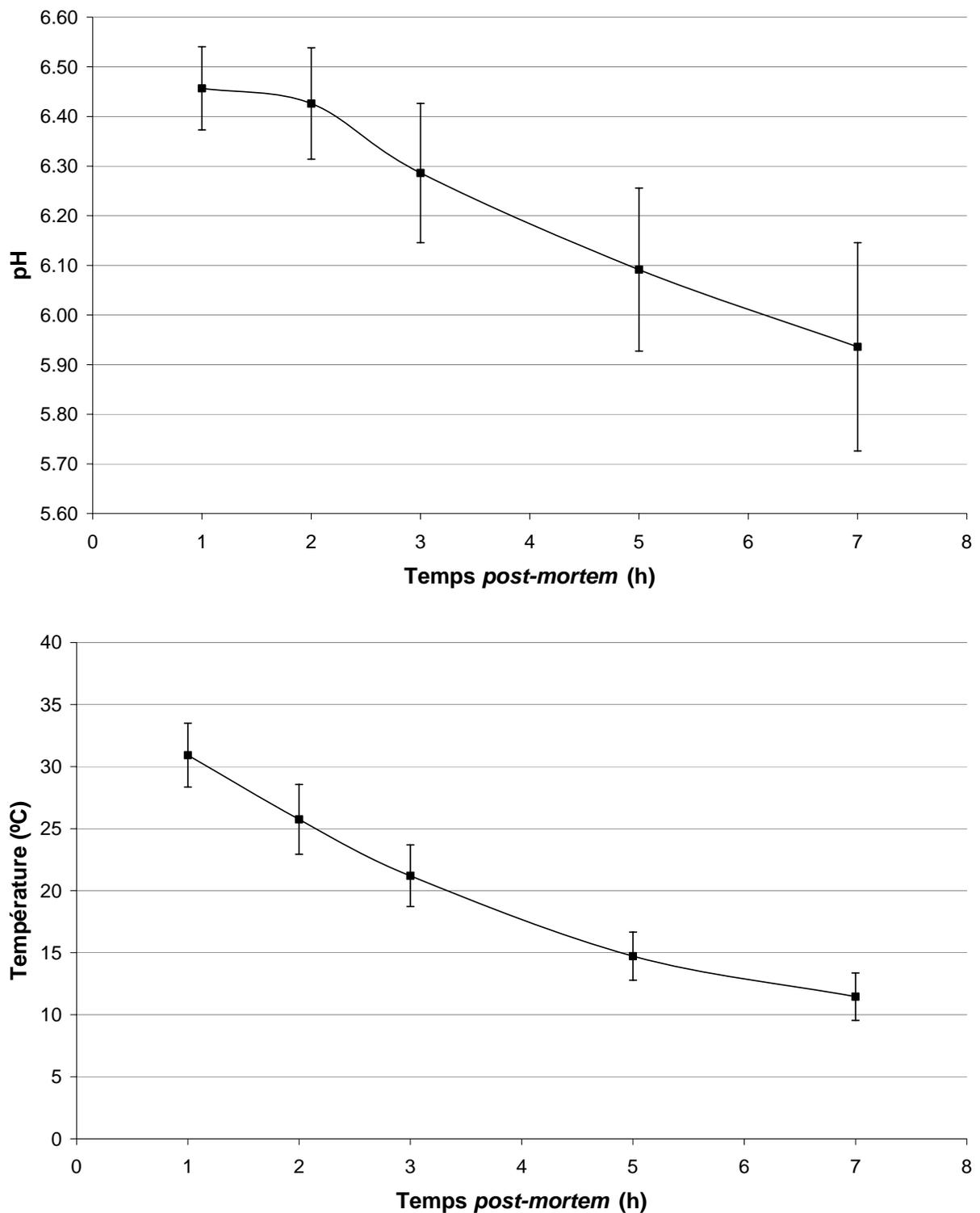


Figure 3. Chute du pH et de la température d'un échantillon de 9 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri (Expérience préliminaire 3)

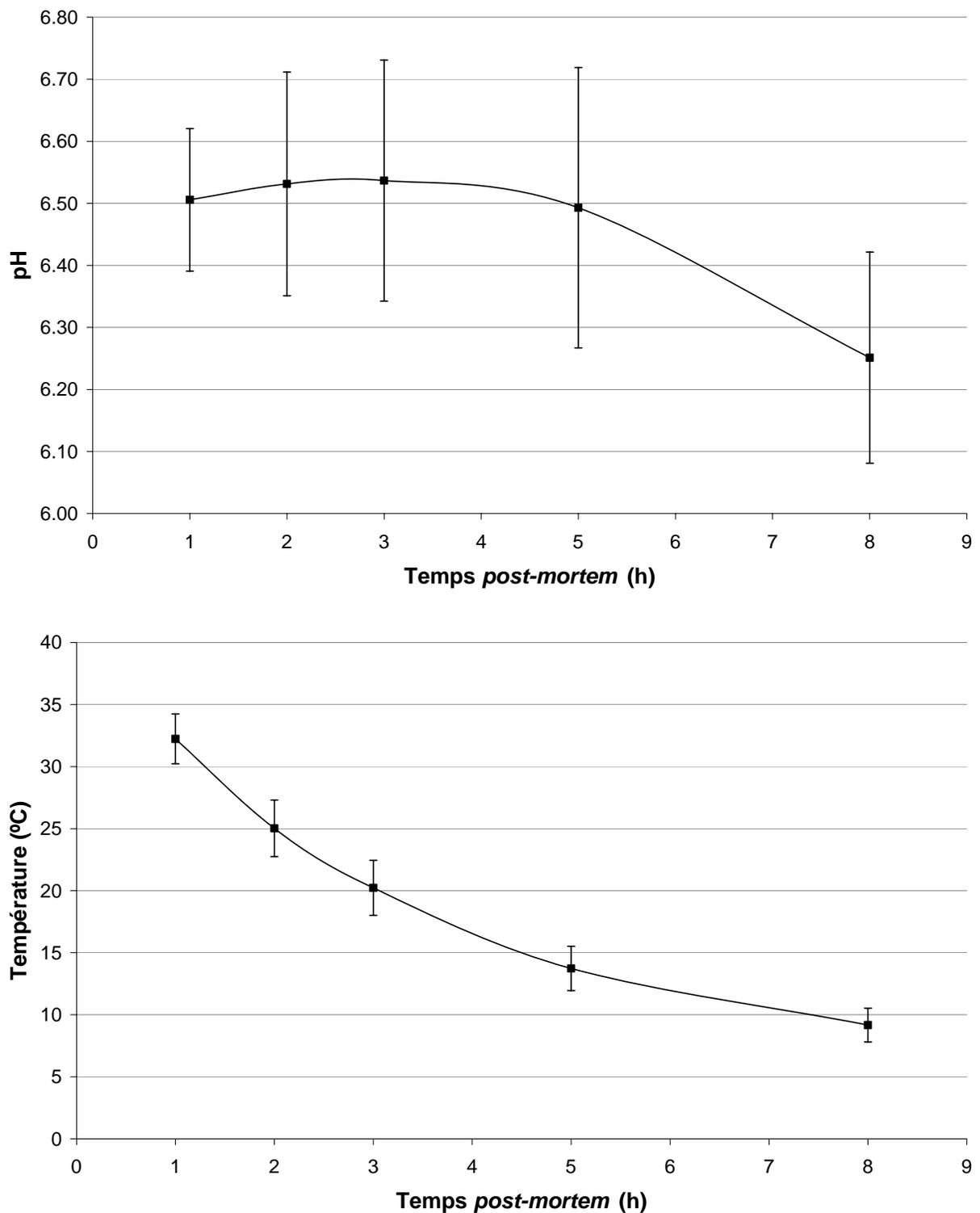


Figure 4. Chute du pH et de la température d'un échantillon de 12 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Rolland Pouliot & fils à Saint-Henri (Expérience préliminaire 4)

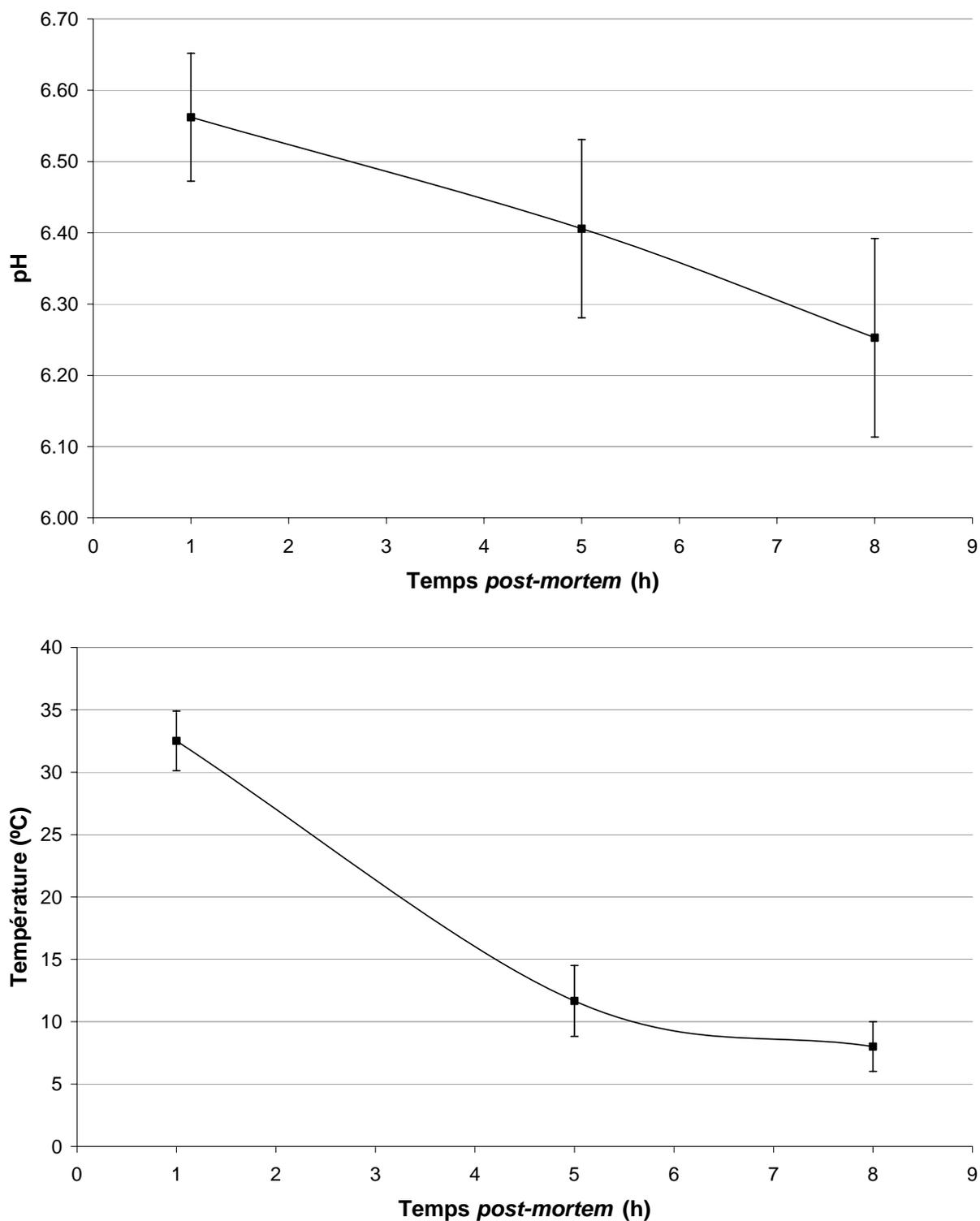


Figure 5. Chute du pH et de la température d'un échantillon de 19 carcasses d'agneaux lourds à l'abattoir Forget à Terrebonne (Expérience préliminaire 5)

5.2. Expérience principale

5.2.1. Suivi de croissance et abattage

Les deux groupes d'agneaux aléatoirement formés suite aux huit semaines d'abattage ont présenté des performances de croissance et une qualité de carcasse très similaires (Tableau 1). C'était l'objectif de produire deux populations d'agneaux et de carcasses identiques de façon à comparer objectivement l'effet des traitements de stimulation et de maturation.

Tableau 1. Performances de croissance et qualité des carcasses des agneaux utilisés pour les traitements postabattages

Variables	Traitement postabattage	
	Non stimulées	Stimulées
Nombre d'agneaux	38	38
Poids initial (kg)	21,9	21,8
Âge initial (j)	58,9	60,0
Poids vif à la sortie (kg)	49,5	49,5
Âge à l'abattage (j)	126,6	129,7
Gain moyen quotidien (g/j)	449,4	436,9
Poids de la carcasse chaude (kg)	22,6	22,7
Rendement carcasse (%)	45,6	45,8
GR ¹ (mm)	8,4	8,4
Cote de conformation moyenne	3,4	3,4

¹ Épaisseur totale des tissus mesurée sur la 12^e côte à 11 cm de la colonne vertébrale à l'aide d'une réglette lors de la classification.

5.2.2. Chute de température et de pH

La chute de la température a été la même pour les carcasses stimulées et les carcasses témoins, ce qui est parfaitement logique puisqu'elles étaient soumises aux mêmes conditions de refroidissement (Figure 6). Cette chute de température a été très rapide : les carcasses ont atteint 10 °C moins de 4 h *post-mortem* et 5 °C en 5 h. À ce moment, le pH des carcasses témoins était autour de 6,6. Ces conditions de pH et de température sont très propices au rétrécissement dû au froid (Devine et al., 2004; Simmons et al., 2008). En effet, un tel pH démontre que les cellules musculaires disposent toujours de beaucoup d'énergie à un moment où la capacité de séquestration du calcium est réduite par la basse température. La présence simultanée de calcium et d'énergie peut engendrer une contraction des fibres musculaires. Pour sa part, la stimulation électrique a engendré un pH inférieur des carcasses tout au long de la période *pré-rigor* (entre 0 et 24 h; $P < 0,001$) sans toutefois affecter le pH ultime de la viande (à 48 h). Lors de la première mesure, la différence de pH entre les carcasses stimulées et témoins était de plus de 0,4 unité, ce qui correspond bien aux valeurs rapportées dans d'autres études (Hwang et al., 2003; Simmons et al., 2008). Le traitement a d'ailleurs permis aux carcasses stimulées d'atteindre la température de 10 °C à un pH inférieur à 6,1. Les chutes de températures et de pH observées chez les carcasses stimulées sont très intéressantes puisque dans ces conditions, le risque de rétrécissement dû au froid est réduit et l'attendrissement de la viande pourrait

même être accéléré. En effet, il est suggéré que les carcasses devraient atteindre un pH de 6,0 avant que la température ne soit sous les 10 °C afin de minimiser les risques de rétrécissement dus au froid (Devine et al., 2004; Simmons et al., 2008). De plus, il est également possible que la chute rapide du pH suite à la stimulation électrique permette d'atteindre le *rigor mortis* plus rapidement. Comme la maturation de la viande semble débiter près du *rigor mortis*, le processus d'attendrissement de la viande pourrait être devancé chez les carcasses stimulées (Simmons et al., 2008). Par contre, bien qu'intéressant, ce traitement de stimulation n'est pas optimal puisque le pH 6 est atteint lorsque la température est sous les 5 °C. Or, en Australie, le programme « Sheep Meat Eating Quality » recommande que le pH 6 soit atteint entre 18 et 25 °C afin d'obtenir la tendreté optimale de la viande (Thompson et al., 2005). Finalement, l'atteinte d'un pH ultime similaire entre les traitements assure que les effets de la stimulation seront dus à la chute plus rapide du pH et non à une différence de pH ultime, paramètre reconnu pour son impact sur la qualité organoleptique des viandes.

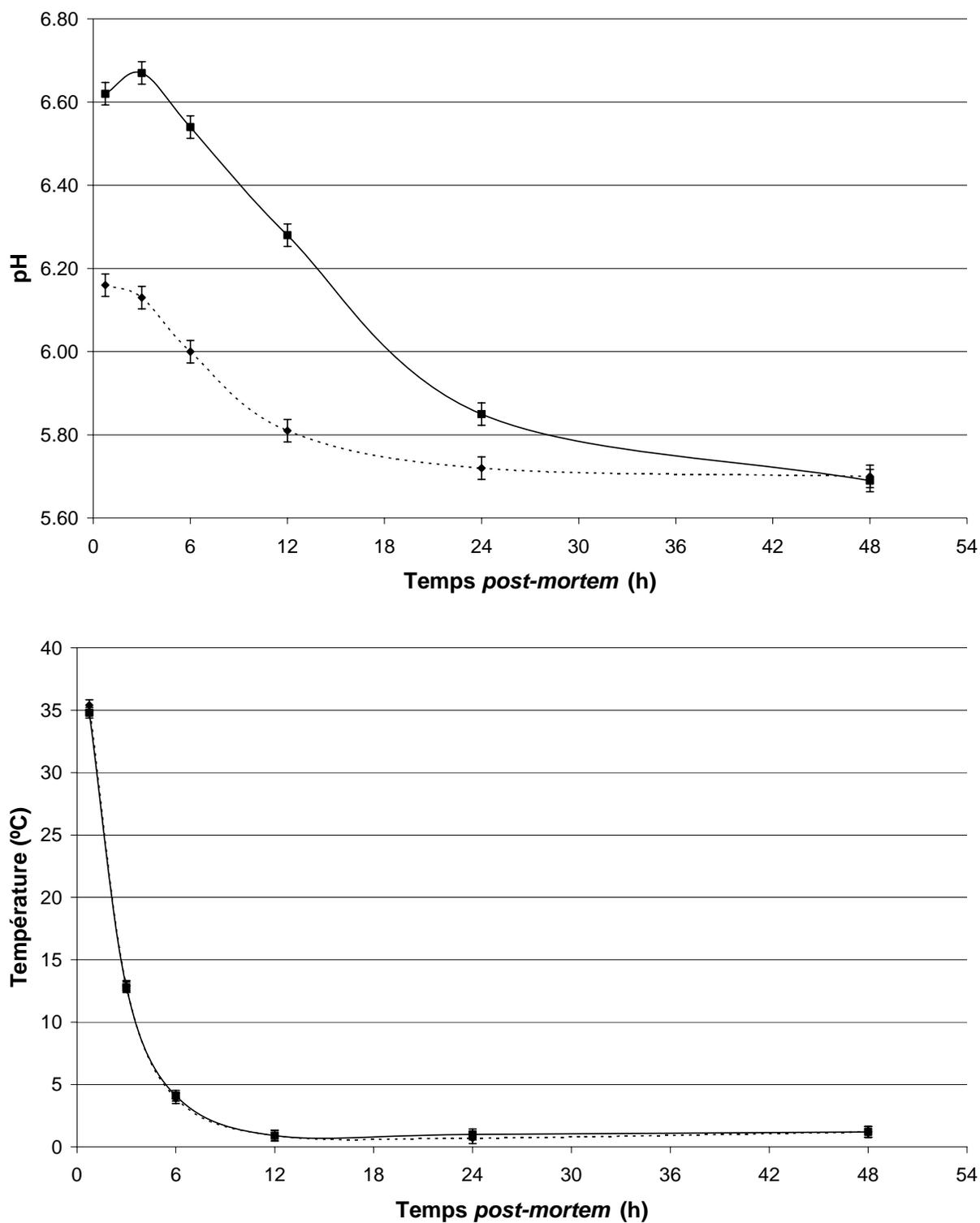


Figure 6. Chute du pH et de la température de carcasses d'agneaux stimulées ----♦---- ou non (témoins) —■— en fonction du temps post-mortem (n=38/traitement)

5.2.3. Impact des traitements postabattages sur la qualité de la viande

Couleur et perte en eau

La stimulation électrique a eu un effet sur la couleur de la viande mesurée 48 h après la mort de l'animal (Tableau 2). Les valeurs des paramètres a^* (axe vert-rouge), b^* (axe bleu-jaune) et L^* (luminosité) ont été supérieures pour la viande provenant des carcasses stimulées, ce qui se traduit respectivement par une viande plus rouge, moins bleue et plus claire. Un tel effet a également été observé suite à une stimulation électrique de plus fort voltage sur des *longissimus* de bœuf (Roeber et al., 2000) et d'agneau (Kerth et al., 1999). Dans le cas présent, ces effets sur la couleur ne sont pas dus à une différence de pH ultime, paramètre reconnu pour avoir un impact majeur sur la couleur. Par contre, il est possible que la glycolyse plus rapide ait affecté la capacité de consommation d'oxygène, permettant ainsi une meilleure oxygénation de la viande lors de la prise de mesure (Simmons et al., 2008). Ce phénomène pourrait expliquer que la viande ait paru plus rouge et claire à ce moment. Finalement, le traitement de stimulation n'a pas influencé la perte en eau, ce qui est parfaitement logique puisque le pH ultime (48 h *post mortem*; Figure 6) de la viande n'a pas été affecté et que le refroidissement était rapide.

Tableau 2. Couleur et perte en eau des *longissimus dorsi* provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique

Variables	Traitement postabattage		SEM	Valeur de P
	Non stimulées	Stimulées		
Couleur				
a^*	13,19	14,43	0,39	< 0,001
b^*	6,73	7,84	0,29	< 0,001
L^*	38,28	39,50	0,51	< 0,01
Perte en eau (%)	1,20	1,27	0,11	0,523

Perte à la cuisson et tendreté

La stimulation électrique et la maturation ont permis d'améliorer la tendreté de la viande déterminée par la force de cisaillement (Tableau 3) et par l'analyse sensorielle (Tableau 4). Indépendamment du traitement de stimulation, la tendreté de la viande s'est améliorée en fonction du temps de maturation ($P < 0,001$). Cet attendrissement de la viande serait dû à la dégradation des protéines myofibrillaires comme en témoigne l'augmentation de l'indice de fragmentation myofibrillaire (Tableau 3; $P < 0,001$). Un tel effet de la maturation est bien connu et documenté (Bate-Smith, 1948; Dransfield et al., 1981; Koohmaraie et al., 1991b). La différence notable de tendreté mesurée par la force de cisaillement et le panel de dégustation entre trois (T3) et huit (T8) jours de maturation démontre qu'il est important pour l'industrie ovine québécoise d'accorder un certain délai avant de commercialiser la viande afin d'optimiser la qualité de son produit. Le fait d'expédier rapidement les carcasses ou les découpes aux fournisseurs (< 48 h *post-mortem*) augmente le risque que la viande soit consommée avant qu'elle ait atteint son potentiel de tendreté. Il a été démontré qu'une période de près de huit jours de maturation permet à la viande ovine d'atteindre environ 80 % de sa tendreté alors que ce niveau n'est que de 50 % après trois jours (Dransfield et al., 1981). La maturation a également

influencé la perte à la cuisson (Tableau 3; $P = 0,030$) tandis qu'aucun effet n'a été observé sur la jutosité de la viande et sa saveur (Tableau 5). En effet, plus le temps de maturation a été long, moins la viande a perdu de poids lors de la cuisson, ce qui a récemment été observé chez l'agneau par Abdullah et Qudsieh (2009). Ce constat pourrait être dû à une amélioration du pouvoir de rétention en eau suite à la maturation (Hamm, 1986) ou bien au fait que l'eau perdue au cours de la maturation ne peut plus être perdue par la suite (Kim et al., 1993). Par contre, comme cette différence n'a pas eu d'impact sur la jutosité de la viande perçue par les dégustateurs (Tableau 4), son effet est négligeable.

De son côté, la stimulation électrique a amélioré la tendreté de la viande, et ce, peu importe le temps de maturation (Tableaux 3 et 4). Ce constat est en accord avec de nombreuses études qui ont démontré l'effet bénéfique de la stimulation sur la tendreté (voir revue de littérature section 2.4). Cet effet serait en partie dû à la longueur des sarcomères qui était supérieure pour la viande de carcasses stimulées (Tableau 3). Tel que le laissent présager les données sur la chute du pH et de la température, la différence de longueur des sarcomères et de tendreté démontrent que les conditions actuelles de refroidissement sont trop sévères pour les carcasses d'agneaux. Ces dernières sont sujettes au phénomène de « cold shortening » qui cause une diminution de la tendreté finale du produit. La chute plus rapide du pH engendrée par la stimulation a permis de réduire le phénomène et d'améliorer la tendreté, ce qui démontre qu'il est possible d'optimiser la tendreté de la viande d'agneaux du Québec en modifiant les pratiques postabattages. Par contre, même dans le cas des carcasses stimulées, les sarcomères sont relativement courts, ce qui laisse croire qu'il y a encore place à amélioration en optimisant la stimulation. Ce constat est logique puisque le pH 6 n'a pas été atteint dans la fenêtre de 18 à 25 °C, tel que recommandé par l'industrie australienne et néo-zélandaise (Thompson et al., 2005; Young et al., 2005).

L'amélioration de la tendreté suite à la stimulation électrique pourrait également résulter d'une maturation plus rapide de la viande. En effet, Simmons et al. (2008) soutiennent que suite à la stimulation électrique, le *rigor mortis* est atteint plus rapidement et la maturation peut débuter plus hâtivement. Les conditions de température plus favorables en fonction du pH pourraient également contribuer à l'accélération de l'attendrissement en favorisant la protéolyse (Simmons et al., 2008). Dans la présente étude, bien que la stimulation puisse avoir permis d'atteindre le *rigor mortis* plus rapidement (voir Figure 6; pH 24 h et 48 h), la température était déjà à 1 °C à 10-12 h *post-mortem*. La maturation aurait donc débuté sous la même température pour les carcasses non stimulées et simulées. Les indices de fragmentation myofibrillaire obtenus au cours de cette étude, de même que les mesures d'activité des calpaïnes (Tableau 5), n'indiquent pas qu'il y ait eu accélération de la protéolyse suite à la stimulation électrique. Peu importe, le fait est qu'après seulement trois jours de maturation, la viande provenant des carcasses stimulées a atteint une tendreté équivalente à celle des carcasses non stimulées maturées huit jours. Or, ce délai correspond relativement bien au temps nécessaire aux carcasses pour atteindre les comptoirs de vente. Toutefois, la tendreté la plus marquée est obtenue pour la viande provenant de carcasses maturées pendant huit jours. Ces résultats démontrent que le refroidissement actuel des carcasses d'agneaux est trop rapide et qu'il y a des conséquences notables sur la tendreté de la viande. De meilleures pratiques telles, un refroidissement moins rapide (peu envisageable pour la plupart des abattoirs dû au mandat multi-espèces de ces entreprises), l'utilisation de la stimulation électrique et une valorisation de la maturation pourraient permettre d'améliorer la tendreté du produit québécois, déjà reconnu pour sa qualité.

La stimulation a aussi eu un impact sur la saveur perçue par les dégustateurs (Tableau 4; $P = 0,042$). En fait, l'intensité de la saveur typique de la viande ovine était moins grande suite à la stimulation. Ce constat est difficile à expliquer. Toutefois, comme l'agneau du Québec est reconnu pour avoir une

flaveur fine et peu prononcée et que la différence n'est pas élevée, cet effet ne devrait pas causer de diminution de l'appréciation, au contraire.

Activités enzymatiques

Tel que mentionné précédemment, le système calpaïnes-calpastatine n'a pas été influencé par la stimulation électrique (Tableau 5). D'autres études ont pourtant montré un impact de la stimulation sur l'activité de ce système (Ducastaing et al., 1985; Hwang and Thompson, 2001b; Lee et al., 2000; Uytterhaegen et al., 1992). Le traitement employé dans la présente étude et la vitesse de refroidissement n'ont pas permis de corroborer ces informations. Puisque le pH et la température ont un impact majeur sur ce système, il est possible que les conditions obtenues au cours de ce projet n'aient pas influencé l'activité des calpaïnes.

Par contre, l'activité de la μ -calpaïne et celle de la m-calpaïne ont diminué au cours des premières 24 h *post-mortem* indépendamment du traitement ($P < 0,001$). Dans le cas de la μ -calpaïne, l'activité à 24 h ne représentait plus que 48 % de l'activité mesurée 45 min après l'abattage tandis que la m-calpaïne avait toujours 83 % de son activité initiale. Il a été montré à plusieurs reprises que l'activité de la μ -calpaïne diminue rapidement durant les premières 24 h tandis que celle de la m-calpaïne chute moins rapidement (Boehm et al., 1998; Koohmaraie et al., 1986; Lee et al., 2000). La μ -calpaïne serait la principale responsable de l'attendrissement de la viande tandis que le rôle de la m-calpaïne serait moins important (Koohmaraie and Geesink, 2006). Toutefois, contrairement à ce qui a déjà été rapporté par d'autres auteurs (Dransfield, 1993, 1994; Lee et al., 2000), l'activité de la calpastatine n'a pas diminué au cours des premières 24 h ($P = 0,393$).

Tableau 3. Paramètres reliés à la tendreté des *longissimus dorsi* provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique (S) et maturées (M) 1, 3 ou 8 j (T1, T3 et T8)

Variables	Traitement postabattage						SEM	Valeur de P		
	Non stimulées			Stimulées				S	M	S×M
	T1	T3	T8	T1	T3	T8				
Perte à la cuisson (%)	21,7	21,2	20,4	21,2	20,7	20,4	0,8	0,642	0,030	0,802
Force de cisaillement (kg)	7,60	6,28	4,48	5,46	4,56	3,03	4,10	< 0,001	< 0,001	0,530
Sarcomères (µm)	1,662			1,747			0,012	< 0,001		
IFM ¹	88,0	103,1	111,2	87,9	98,9	109,9	4,1	0,598	< 0,001	0,586

¹ IFM = Indice de fragmentation myofibrillaire.

Tableau 4. Analyse sensorielle des *longissimus dorsi* provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique (S) et maturées (M) 1, 3 ou 8 j (T1, T3 et T8)

Variables	Traitement postabattage						SEM	Valeur de P		
	Non stimulées			Stimulées				S	M	S×M
	T1	T3	T8	T1	T3	T8				
Fermeté	4,87	4,70	3,73	4,45	3,53	2,93	0,22	< 0,001	< 0,001	0,057
Jutosité	3,05	2,91	2,64	2,64	2,89	2,78	0,23	0,477	0,491	0,220
Flaveur	3,86	3,76	3,92	3,54	3,62	3,59	0,22	0,042	0,909	0,801

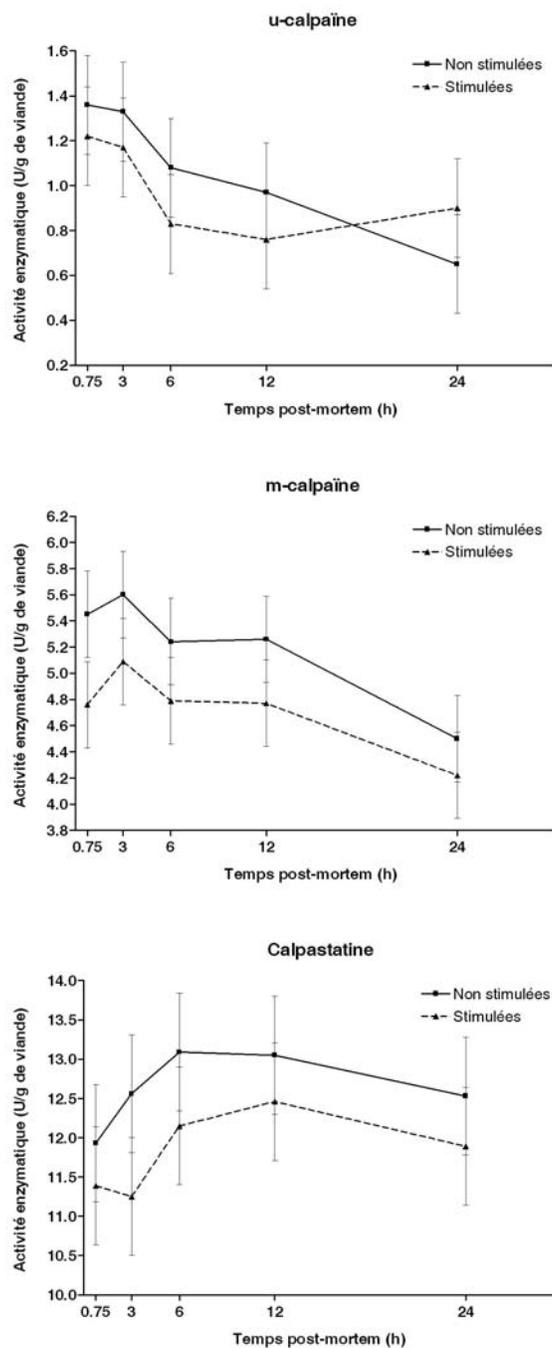


Figure 7. Suivi des activités du système calpaïnes-calpastatine durant le premier 24 h *post-mortem* des *longissimus dorsi* provenant de carcasses soumises ou non à un traitement de stimulation électrique

6. CONCLUSION ET IMPACTS DE L'ÉTUDE

Les résultats de cette étude démontrent que le refroidissement des carcasses d'agneaux est actuellement trop rapide dans les plus importants abattoirs d'ovins du Québec et qu'il ne permet pas à la viande d'agneau d'atteindre son plein potentiel de tendreté. Cette recherche a démontré qu'une période de maturation de la viande entre 3 et 8 jours a un impact bénéfique sur la tendreté de la viande. L'utilisation d'un système commercial de stimulation électrique à bas voltage a engendré une amélioration notable de la tendreté de la viande d'agneau, qu'elle soit mesurée objectivement par les forces de cisaillement ou lors de tests sensoriels exécutés par un panel de dégustateurs. La stimulation électrique a permis d'atteindre une tendreté équivalente à 8 jours de maturation (carcasses non stimulées) en seulement 3 jours avec les carcasses stimulées. Ce délai correspond approximativement au temps nécessaire pour que la viande atteigne les tablettes. Toutefois, la tendreté maximale obtenue dans cette étude a été mesurée sur des carcasses stimulées et maturées pendant 8 jours. Il importe de souligner que la stimulation et la maturation n'ont eu que de faibles impacts sur les autres paramètres de qualité et que la majorité d'entre eux étaient plutôt positifs.

La stimulation électrique s'avère donc une option très intéressante pour l'industrie ovine québécoise pour optimiser la tendreté de la viande d'agneau dans un délai raisonnable (3 jours) pour l'ensemble de la chaîne. Par contre, d'autres recherches seront nécessaires afin d'optimiser la technique et d'engendrer le plus de bénéfices possible pour la qualité du produit. Les Australiens et les Néo-Zélandais travaillent depuis des années sur le sujet. Ils ont comme objectif d'utiliser un système permettant à la grande majorité des carcasses d'atteindre le pH 6 dans une fenêtre de température allant de 18 à 25 °C : objectif que l'industrie ovine québécoise devrait également partager.

7. DIFFUSION DES RÉSULTATS

Au cours des prochains mois, les résultats de ce projet seront rendus public. Tout d'abord, une affiche scientifique sera présentée le 15 juillet 2009 à Montréal dans le cadre du congrès de l'American Society of Animal Science (ASAS). Par la suite, les résultats seront présentés à un très grand nombre d'acteurs de l'industrie ovine québécoise lors d'une conférence au Symposium Ovin 2009 qui se tiendra le 18 septembre 2009 à Granby. Suite à cet événement, un article paraîtra dans l'Ovin Québec. Un article sera également soumis à une revue scientifique (Meat Science ou Journal of Animal Science) fin 2009 ou début 2010. Finalement, d'autres conférences pourraient suivre s'il y a une demande de l'industrie.

8. RÉFÉRENCES

- Abdullah, A. Y. et Qudsieh, R. I. 2009. Effect of slaughter weight and aging time on the quality of meat from Awassi ram lambs. *Meat Sci.* **82**: 309-316.
- Agriculture Canada. 1992. Règlement sur la classification des carcasses de bétail et de volaille (DORS/92-541). *Gazette du Canada, Partie II* **126**: 3848.
- 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.

- Boehm, M. L., Kendall, T. L., Thompson, V. F. et Goll, D. E. 1998. Changes in the calpains and calpastatin during postmortem storage of bovine muscle. *J. Anim Sci.* **76**: 2415-2434.
- Bouton, P. E., Carroll, F. D., Harris, P. V. et Shorthose, W. R. 1973. Influence of pH and fiber contraction state upon factors affecting the tenderness of bovine muscle. *J. Food Sci.* **38**: 404-407.
- 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.
- Chrystall, B. B. et Hagyard, C. J. 1976. Electrical stimulation and lamb tenderness. *New Zeal J. Agr. Res.* **19**: 7-11.
- Chrystall, B. B. et Devine, C. E. 1985. Electrical stimulation: Its early development in New Zealand. Pages 73-119 dans A.M. Pearson et T.R. Dutson (eds.). *Electrical Stimulation. Advances in meat research.* AVI Publishing company, Westport, Connecticut.
- Cross, H. R. 1979. Effects of electrical stimulation on meat tissue and muscle properties- A review. *J. Food Sci.* **44**: 509-514.
- Davey, C. L. et Gilbert, K. V. 1968. Studies in meat tenderness. 4. Changes in the extractability of myofibrillar proteins during meat aging. *J. Food Sci.* **33**: 2-7.
- Davey, C. L. et Dickson, M. R. 1970. Studies in meat tenderness 8. Ultra-structural changes in meat during ageing. *J. Food Sci.* **35**: 56-60.
- den Hertog-Meischke, M. J., Smulders, F. J., Van Logtestijn, J. G. et van Knapen, F. 1997. The effect of electrical stimulation on the water-holding capacity and protein denaturation of two bovine muscles. *J. Anim. Sci.* **75**: 118-124.
- Devine, C. E., Hopkins, D. L., Hwang, I. H., Ferguson, D. M. et Richards, I. 2004. Electrical stimulation. Pages 413-423 dans W.K. Jensen (ed.). *Encyclopedia of Meat Sciences.* Elsevier, Oxford.
- Devine, C. E. 2004. Conversion of muscle to meat : Ageing. Pages 330-338 dans W. Jensen, C. Devine et M. Dikeman (eds.). *Encyclopedia of meat sciences.* Elsevier, Oxford.
- Devine, C. E., Lowe, T. E., Wells, R. W., Edwards, N. J., Hocking Edwards, J. E., Starbuck, T. J. et Speck, P. A. 2006. Pre-slaughter stress arising from on-farm handling and its interactions with electrical stimulation on tenderness of lambs. *Meat Sci.* **73**: 304-312.
- 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., 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., 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.
- Dransfield, E. 1992a. Modelling post-mortem tenderisation-II: Enzyme changes during storage of electrically stimulated and non-stimulated beef. *Meat Sci.* **31**: 75-84.
- Dransfield, E. 1992b. 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. 1994. Modelling post-mortem tenderisation-V: Inactivation of calpains. *Meat Sci.* **37**: 391-409.
- Ducastaing, A., Valin, C., Schollmeyer, J. et Cross, R. 1985. Effects of electrical stimulation on post-mortem changes in the activities of two Ca dependent neutral proteinases and their inhibitor in beef muscle. *Meat Sci.* **15**: 193-202.

- Geesink, G. H., Kushay, S., Chisthi, A. H. et Koohmaraie, M. 2006. u-Calpain is essential for postmortem proteolysis of muscle proteins. *J. Anim. Sci.* **84**: 2834-2840.
- Hamm, R. 1986. Functional properties of the myofibrillar system and their measurements. Pages 135-199 dans P.J. Bechtel (ed.). *Muscle as food*. Academic Press, Orlando.
- 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.
- Honikel, K. O. 2004. Conversion of muscle to meat : Cold and heat shortening. Pages 318-323 dans W. Jensen, C. Devine et M. Dikeman (eds.). *Encyclopedia of meat sciences*. Elsevier, Oxford.
- Hopkins, D. L. et Taylor, R. G. 2004. Post-mortem muscle proteolysis and meat tenderness. Pages 363-388 dans M.F.W. te Pas, M.E. Everts et H.P. Haagsman (eds.). *Muscle Development of Livestock Animals : Physiology, Genetics and Meat Quality*. CABI publishing, Wallingford, Royaume-Unis.
- Hopkins, D. L., Shaw, F. D., Baud, S. R. et Walker, P. J. 2005. Effect of level of current during lamb carcass electrical stimulation on post-mortem muscle changes and meat quality. *Proc. N.Z. Soc. Anim. Prod.* **65**: 247-251.
- Hwang, I. H. et Thompson, J. M. 2001a. 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.
- Hwang, I. H. et Thompson, J. M. 2001b. 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., 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.
- 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.
- Kim, B. C., Warner, R. D. et Kauffman, R. G. 1993. Changes in expressible fluid losses of porcine musculature at different times post-rigor. 39th International Congress of meat and technology, Calgary, Alberta.
- King, D. A., Voges, K. L., Hale, D. S., Waldron, D. F., Taylor, C. A. et Savell, J. W. 2004. High voltage electrical stimulation enhances muscle tenderness, increases aging response, and improves muscle color from cabrito carcasses. *Meat Sci.* **68**: 529-535.
- Koohmaraie, M., Schollmeyer, J. E. et Dutson, T. R. 1986. Effect of low-calcium-requiring calcium activated factor on myofibrils under varying pH and temperature conditions. *J. Food Sci.* **51**: 28-32.
- Koohmaraie, M., Whipple, G., Kretchmar, D. H., Crouse, J. D. et Mersmann, H. J. 1991. Postmortem proteolysis in longissimus muscle from beef, lamb and pork carcasses. *J. Anim. Sci.* **69**: 617-624.
- 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.
- Lawrie, R. A. 1998. *Lawrie's meat science*. 6th ed. Woodhead publishing limited, Cambridge, Royaume-Unis. 336 pp.
- Lee, S., Polidori, P., Kauffman, R. G. et Kim, B. C. 2000. Low-voltage electrical stimulation effects on proteolysis and lamb tenderness. *J. Food Sci.* **65**: 786-790.

- Lewis, P. K. et Babiker, S. A. 1983. Effect of electrical stimulation and cooking temperature on the within-sample variation of cooking loss and shear force of lamb. *Meat Sci.* **8**: 317-321.
- Locker, R. H. et Hagyard, C. J. 1963. A cold shortening effect in beef muscle. *J. Sci. Food Agr.* **14**: 787.
- Marsh, B. B. et Leet, N. G. 1966. Studies on meat tenderness. III. Effect of cold shortening on tenderness. *J. Food Sci.* **31**: 450.
- Miller, M. F., Carr, M. A., Ramsey, C. B., Crockett, K. L. et Hoover, K. A. 2001. Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. *J. Anim. Sci.* **79**: 3062-3068.
- Morton, H. C. et Newbold, R. P. 1982. Pathways of high and low voltage electrical stimulation in sheep carcasses. *Meat Sci.* **7**: 285-297.
- Morton, J. D., Bickerstaffe, R., Kent, M. P., Dransfield, E. et Keeley, G. M. 1999. Calpain-calpastatin and toughness in *M. longissimus* from electrically stimulated lamb and beef carcasses. *Meat Sci.* **52**: 71-79.
- O'Halloran, G. R., Troy, D. J., Buckley, D. J. et Reville, W. J. 1997a. The role of endogenous proteases in the tenderisation of fast glycolysing muscle. *Meat Sci.* **47**: 187-210.
- O'Halloran, G. R., Troy, D. J. et Buckley, D. J. 1997b. The relationship between early post-mortem pH and the tenderisation of beef muscles. *Meat Sci.* **45**: 239-251.
- Offer, G. 1991. Modelling of the formation of pale, soft and exudative meat: Effects of chilling regime and rate and extent of glycolysis. *Meat Sci.* **30**: 157-184.
- Ouali, A. et Talmant, A. 1990. Calpains and calpastatins distribution in bovine, porcine and ovine skeletal muscles. *Meat Sci.* **28**: 331-348.
- 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.
- Pearson, A. M. et Young, R. B. 1989. *Muscle and meat biochemistry*. Academic press, San Diego. 457 pp.
- Penny, I. F. 1977. The effect of temperature on the drip, denaturation and extracellular space of pork *longissimus dorsi* muscle. *J. Sci. Food Agr.* **28**: 329-338.
- Polidori, P., Lee, S., Kauffman, R. G. et Marsh, B. B. 1999. Low voltage electrical stimulation of lamb carcasses: effect on meat quality. *Meat Sci.* **53**: 179-182.
- Roeber, D. L., Cannell, R. C., Belk, K. E., Tatum, J. D. et Smith, G. C. 2000. Effects of a unique application of electrical stimulation on tenderness, color, and quality attributes of the beef *longissimus* muscle. *J. Anim. Sci.* **78**: 1504-1509.
- Sanudo, C., Sanchez, A. et Alfonso, M. 1998. Small ruminant production systems and factors affecting lamb meat quality. *Meat Sci.* **49**: s29-s64.
- Sazili, A. Q., Parr, T., Sensky, P. L., Jones, S. W., Bardsley, R. G. et Buttery, P. J. 2005. The relationship between slow and fast myosin heavy chain content, calpastatin and meat tenderness in different ovine muscle skeletal muscles. *Meat Sci.* **69**: 17-25.
- Shaw, F. D., Baud, S. R., Reichards, I., Pethick, D. W., Walker, P. J. et Thompson, J. M. 2005. New electrical stimulation technologies for sheep carcasses. *Aust. J. Exp. Agric.* **45**: 575-583.
- Simmons, N. J., Daly, C. C., Mudford, C. R., Richards, I., Jarvis, G. et Pleiter, H. 2006. Integrated technologies to enhance meat quality - An Australasian perspective. *Meat Sci.* **74**: 172-179.
- 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.

- Takahashi, G., Lochner, 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: 565-573.
- Toohy, E. S., Hopkins, D. L., McLeod, B. M. et Nielsen, S. G. 2006. Quantifying the rate of pH and temperature decline in lamb carcasses at three abattoirs in New South Wales. *Aust. J. Exp. Agric.* 46: 875-878.
- Toohy, 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.
- Touraille, C. 1994. Influence of muscle characteristics on sensory properties of meat. *Renc. Rech. Ruminants.* 1: 169-176.
- 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.
- Whitaker, J. R. 1959. Chemical changes associated with aging of meat with emphasis on the proteins. *Adv. Food Res.* 9: 1.
- Wiklund, E., Finstad, G., Johansson, L., Aguiar, G. et Bechtel, P. J. 2008. Carcass composition and yield of Alaskan reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) steers and effects of electrical stimulation applied during field slaughter on meat quality. *Meat Sci.* 78: 185-193.
- Young, O. A., Hopkins, D. L. et Pethick, D. W. 2005. Critical control points for meat quality in the Australian sheep meat supply chain. *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 593-601.

9. PLAN DE FINANCEMENT ET RAPPORT FINANCIER

Le plan de financement détaillé et le rapport financier sont présentés dans un document joint au présent rapport technique. Le budget accordé par le CDAQ a été respecté à la lettre.