

Stress en élevage et à l'abattage : impacts sur les qualités des viandes

E.M.C. TERLOUW^{1,2}, I. CASSAR-MALEK^{1,2}, B. PICARD^{1,2}, C. BOURGUET³, V. DEISS^{1,2},
C. ARNOULD^{4,5,6,7}, C. BERRI⁸, E. LE BIHAN-DUVAL⁸, F. LEFÈVRE⁹, B. LEBRET^{10,11}

¹ INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

² Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000, Clermont-Ferrand, France

³ Bureau E.T.R.E., Etudes et Travaux de Recherches en Ethologie, Bravant, F-63210 Olby, France

⁴ INRA, UMR85 Physiologie de la Reproduction et des Comportements, F-37380 Nouzilly, France

⁵ CNRS, UMR7247, F-37380 Nouzilly, France

⁶ Université François Rabelais de Tours, F-37000 Tours, France

⁷ IFCE, F-37380 Nouzilly, France

⁸ INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

⁹ INRA, UR1037 Physiologie et Génomique des Poissons, F-35000 Rennes

¹⁰ INRA, UMR1348 PEGASE, F-35590 Saint-Gilles, France

¹¹ Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, F-35000 Rennes, France

Courriel : claudia.terlouw@clermont.inra.fr

L'implication du stress avant l'abattage sur les défauts majeurs de qualité des viandes est bien connue. Les données disponibles montrent que le stress peut expliquer une part importante des variations des qualités technologiques et sensorielles des viandes, chez l'ensemble des espèces consommées. Les travaux actuels visent à comprendre les mécanismes physiologiques et moléculaires sous-jacents, qui semblent varier selon l'espèce et même selon l'état de stress de l'animal au moment de l'abattage¹.

On sait depuis plusieurs décennies que les conditions d'abattage influencent les qualités des viandes. Les recherches se sont d'abord intéressées à la production de viandes à défaut majeur : les viandes à coupe sombre, ou DFD (« *Dark, Firm and Dry* »), et les viandes exsudatives, ou PSE (« *Pale, Soft and Exudative* »). Les premières sont caractérisées par un pH ultime élevé et une très mauvaise conservation. Elles peuvent être observées dans toutes les espèces bouchères. Les viandes exsudatives sont quant à elles caractérisées par une diminution rapide du pH *post mortem* (*p.m.*) ; elles ont un pouvoir de rétention d'eau faible et deviennent dures après cuisson. Ce défaut est essentiellement observé chez le porc et la volaille (voir Berri 2015, Lebret et Faure 2015 ce numéro). Ces recherches initiales ont permis de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans le déterminisme des qualités technologiques et sensorielles des viandes. Aujourd'hui, les progrès sur le terrain

(meilleures conditions de transport, d'hébergement et de manipulation des animaux) ont permis de limiter les risques de production de telles viandes. Les études relatives aux effets du stress sur les qualités des produits se sont par la suite élargies aux espèces moins étudiées comme les ovins et les poissons (Terlouw *et al* 2008). Les travaux ont également apporté de nouvelles connaissances sur les sources de stress à l'abattage, en particulier le stress émotionnel, et sur les rôles respectifs du patrimoine génétique et du vécu dans la réactivité au stress. Plus récemment, les recherches ont permis d'approfondir nos connaissances sur les effets du stress avant l'abattage qui, même lorsqu'il est limité, peut être à l'origine de variations des qualités technologiques et sensorielles des viandes.

Le stress peut se définir comme l'ensemble des réactions comportementales et physiologiques en réponse à une menace réelle ou imaginaire, associées à un état

émotionnel négatif. L'abattage comprend une série de procédures potentiellement stressantes, qui débutent généralement avec la mise à jeun et le départ pour l'abattoir et qui s'achèvent lors de la mise à mort de l'animal. Pendant cette période, certains facteurs de stress sont d'origine physique ou physiologique, comme la privation alimentaire, la fatigue ou la douleur, et d'autres sont d'origine psychologique, comme la présence de l'homme, l'absence de congénères familiers ou la confrontation à des environnements nouveaux. Les causes de stress pendant la période pré-abattage et pendant l'abattage ont fait l'objet d'une revue de la littérature précédemment (Terlouw *et al* 2008). Les principales réponses physiologiques de stress correspondent à l'augmentation de la fréquence cardiaque et à la sécrétion d'hormones dites « de stress » : cortisol et catécholamines. Les réactions comportementales peuvent se traduire par la fuite ou par des attaques. Ces réactions physiologiques et com-

¹ Ce texte s'appuie sur l'article de Terlouw *et al* (2012) publié dans le Numéro Spécial de la revue Viandes et Produits Carnés publié à l'occasion des Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes de 2012.

portementales peuvent avoir des effets mesurables sur les qualités des viandes dont le métabolisme sous-jacents impliquent le métabolisme énergétique musculaire. Les réactions physiques et physiologiques se produisant dans les heures précédant l'abattage diminuent les réserves en glycogène du muscle, ce qui peut se traduire par un pH ultime plus élevé et une couleur de la viande plus sombre. En revanche, ces mêmes réactions ayant lieu dans les minutes précédant l'abattage résultent en une accélération du métabolisme musculaire qui perdure après la mort et qui peut se traduire par une acidification musculaire *p.m.* plus rapide, alors que l'abaissement de la température musculaire est ralenti (Terlouw et Rybarczyk 2008). La viande sera alors plus claire, avec un moins bon pouvoir de rétention d'eau (Monin 2003, Lefèvre *et al* 2008a, Terlouw *et al* 2008).

Pour certaines espèces, les évolutions du pH et de la température *p.m.* peuvent expliquer une grande part de la variabilité des qualités technologiques et sensorielles des produits, comme le pouvoir de rétention d'eau, la couleur, la texture ou la tendreté (cf. Lebret et Picard 2015, ce numéro). C'est le cas chez les porcs, la volaille et les poissons (Jelenikova *et al* 2008, Le Bihan-Duval *et al* 2008, Lefèvre *et al* 2008a, Bjornevik et Solbakken 2010). Chez les bovins et les ovins, les liens entre les caractéristiques sensorielles et l'évolution du pH *p.m.* semblent beaucoup plus complexes (Boudjellal *et al* 2008).

Quelle que soit l'espèce, les mécanismes cellulaires et moléculaires impliqués dans les effets du stress sur les qualités des viandes sont encore peu connus. Récemment, des techniques de génomique ont été utilisées chez certaines espèces (porc, bovins, poissons) pour tenter de les élucider. Ces techniques concernent pour l'instant la transcriptomique et la protéomique, permettant le criblage respectif des transcrits des gènes actifs (ARNm) et de protéines dans des tissus, le plus souvent du muscle prélevé *p.m.* (Anon 2009). Ces approches permettent de faire le lien entre ces molécules, le stress de l'animal et/ou certaines composantes de qualité des viandes et de progresser dans la compréhension des mécanismes biochimiques mis en jeu. La présente synthèse expose pour chaque espèce les derniers travaux sur ce sujet.

1 / Porcs

Chez le porc, des recherches ont visé à identifier les causes exactes des réactions de stress en période pré-abattage et leurs liens avec les qualités des viandes. Le regroupement de porcs non-familiers pendant le transport et l'attente à l'abattoir peut stimuler l'expression de compor-

tements agressifs. On sait aujourd'hui que l'activité physique et les réactions physiologiques dues aux combats peuvent avoir un impact considérable sur les qualités des viandes (Terlouw *et al* 2005, Foury *et al* 2011). Sur le plan physiologique, une fréquence cardiaque ou des taux de catécholamines élevés au cours de l'abattage peuvent être associés à une diminution du pH *p.m.* plus rapide ou à un pH ultime plus élevé, avec par exemple des répercussions sur la couleur et le pouvoir de rétention d'eau (Terlouw et Rybarczyk 2008, Foury *et al* 2005, 2011).

Différentes études ont tenté de comprendre l'origine des différences entre individus dans leurs réactions aux facteurs de stress. Les premiers travaux ont mis en évidence une cohérence entre les réactions au stress mesurées au cours de l'élevage et celles recueillies pendant la période d'abattage. Par exemple, les porcs qui ont moins tendance à s'approcher de l'Homme pendant un test, sont plus réactifs à l'abattage, comme indiqué par un métabolisme musculaire *p.m.* plus rapide (Terlouw *et al* 2005, Terlouw et Rybarczyk 2008). De même, les porcs qui explorent plus longtemps un objet non familier pendant un test de nouveauté, s'engagent dans plus de combats lorsqu'ils sont mélangés avec d'autres porcs pendant la période d'abattage. Par conséquent, leurs viandes présentent un pH ultime plus élevé. Dans ces travaux, la réactivité au stress mesurée en élevage pouvait expliquer jusqu'à 70% de la variabilité observée sur le pH ultime et la couleur des viandes (Terlouw *et al* 2005, Terlouw et Rybarczyk 2008). Le lien entre la tendance à explorer et l'agressivité a été observé dans plusieurs études chez le porc, mais il reste difficile à expliquer (Lawrence *et al* 1991, Olsson *et al* 1999, O'Connell *et al* 2004).

Certains travaux se sont intéressés à l'effet du patrimoine génétique des porcs sur leur réactivité au stress et la qualité de leur viande. Pendant des tests réalisés au cours de la période d'élevage, les porcs Duroc étaient plus actifs et s'approchaient plus facilement de l'Homme que les porcs Large White. À l'abattage, à la différence des Large White, le pH ultime de la viande des porcs Duroc n'était pas influencé par les conditions d'abattage qui comprenaient différentes modalités de mélange et de durées de privation alimentaire, de transport et d'attente à l'abattoir. La moindre sensibilité des porcs Duroc aux contraintes physiques et émotionnelles de l'abattage était en partie liée aux caractéristiques de leur métabolisme musculaire (Terlouw et Rybarczyk 2008). Le rôle des caractéristiques du métabolisme musculaire est également illustré chez les porcs porteurs d'un ou deux allèles de la sensibilité à l'halothane (n). Les effets de cet allèle sur les réactions au

stress et les qualités des viandes sont bien connus. Ils sont liés à une aberration métabolique (défaut de régulation des flux d'ions calcium à travers la membrane du réticulum sarcoplasmique des cellules musculaires, Fuji *et al* 1991) et non pas à la façon dont les porcs évaluent leur environnement en termes de stress (Cheah et Cheah 1981, Terlouw *et al* 2001).

Le vécu peut également influencer les réactions de stress des porcs y compris au cours de l'abattage. Des porcs qui ont eu des contacts positifs répétés avec l'éleveur s'approchent plus facilement d'autres personnes y compris non familières (Terlouw et Porcher 2005). En revanche, les porcs ayant eu des contacts négatifs avec un expérimentateur présentent des réserves en glycogène musculaire amoindries si cette personne les conduit pendant la période d'abattage, suggérant un stress plus intense (Terlouw *et al* 2005). Une autre question fréquemment soulevée est de savoir si l'environnement des animaux en élevage (type d'habitat) influence leur réactivité au changement d'environnement et au stress en période pré-abattage, et par la suite influence la qualité de la viande (Lebret 2008). Terlouw *et al* (2009) ont évalué l'influence du mode d'élevage (conditions extensives vs. conventionnelles) sur le comportement lors d'un mélange avec des porcs non familiers au cours de la période pré-abattage (abattage en conditions industrielles). Le mélange suscite moins de combats chez les porcs élevés en extérieur, conduisant à moins de lésions corporelles, une teneur en glycogène musculaire au moment de l'abattage supérieure et par conséquent un pH ultime de la viande plus bas comparativement aux porcs conventionnels. Des résultats similaires ont été rapportés par Barton-Gade (2008), suggérant que le mélange conduit à plus d'agressivité chez les porcs conventionnels, provoquant probablement plus de stress. Une autre étude, comparant l'élevage conventionnel sur caillebotis à un mode alternatif sur litière avec courette extérieure, montre que le milieu enrichi diminue les réactions comportementales vis-à-vis d'un objet non-familier introduit dans la case d'élevage (Meunier-Salaün *et al* 2006). En revanche, pendant la période d'abattage, il n'y avait pas de différences entre ces groupes en termes de réactions comportementales ou physiologiques, ni de métabolisme musculaire *p.m.* précoce. Ce manque de différences s'explique par les conditions de stress limité lors de l'abattage dans cette étude (abattage en conditions expérimentales) qui ont induit peu de réponses (Lebret *et al* 2006). Une étude complémentaire a montré que dans ces conditions de stress limité, le type génétique des porcs (croisés issus de verrats Duroc ou de verrats d'une lignée synthétique) n'influait pas la réponse comportementale

et physiologique (évaluée par des indicateurs métaboliques, plasmatiques et musculaires) des animaux aux conditions d'élevage et au stress pré-abattage (Lebret *et al* 2011).

Le niveau de combat lors du mélange d'animaux pourrait également être influencé par les hormones sexuelles. La production de mâles entiers est bénéfique en termes de bien-être et de coûts de production (efficacité alimentaire supérieure et adiposité réduite relativement aux castrés). En revanche, les viandes des mâles entiers peuvent présenter des problèmes d'odeurs liés à la présence de scatole et d'androsténone dans les tissus adipeux (Lebret et Faure 2015). En outre, les mâles entiers pourraient être plus agressifs en élevage, y compris vis-à-vis de l'éleveur, et à l'abattage (EFSA 2004). Actuellement, la castration chirurgicale pratiquée pour limiter ces risques est remise en cause en raison de son atteinte au bien-être animal, aussi des techniques d'immunocastration ont été développées. Un travail récent a évalué l'effet de l'immunocastration sur la qualité de la viande en fonction du mélange ou non avec des animaux non familiers en comparant 3 types sexuels : entier, immunocastré ou castré. Le mélange a provoqué des comportements agonistiques des animaux, mais de manière équivalente dans les 3 types sexuels. Ainsi, contrairement aux attentes, que les porcs soient entiers ou immunocastrés, ils n'exprimaient pas plus de comportements agressifs pendant la période d'abattage que les porcs castrés chirurgicalement et les qualités de leurs viandes, en termes de pH et de couleur, étaient similaires (Lebret *et al* 2012). D'autres travaux récents confirment ces résultats (Tallet *et al* 2011).

Enfin, certaines études explorent les mécanismes physiologiques et moléculaires impliqués dans les effets du stress sur les qualités des viandes. L'adrénaline et la noradrénaline mesurées dans l'urine prélevée après l'abattage reflètent leurs taux sanguins pendant la période pré-abattage. La corrélation entre des taux urinaires ou sanguins d'adrénaline élevés et un pH ultime élevé s'explique au moins en partie par l'effet stimulant de l'adrénaline sur la dégradation du glycogène dans le muscle actif (Febbraio *et al* 1998, Jensen *et al* 1999). La noradrénaline et la fréquence cardiaque n'ont pas d'effet direct sur le métabolisme musculaire. Leur corrélation avec les composantes de la qualité de la viande s'explique par leur corrélation avec l'effort physique et avec les taux d'adrénaline, qui influencent directement le métabolisme musculaire (Febbraio *et al* 1998, Jensen *et al* 1999). Le contexte de l'abattage joue également un rôle, car à même niveau de noradrénaline urinaire, le pH ultime

Figure 1. Relations entre la teneur en noradrénaline dans l'urine prélevée juste après l'abattage et le pH ultime du Longissimus lumborum chez des porcs selon les conditions en pré-abattage (d'après Terlouw *et al* 2009).

Les porcs étaient soit mélangés pendant 1h30, puis transportés à l'abattoir (45 min) et abattus le lendemain matin (symboles roses ; $r = 0,92$; $P = 0,001$), soit non mélangés et abattus immédiatement après le transport (45 min ; symboles rouges ; $r = 0,57$; $P = 0,14$).

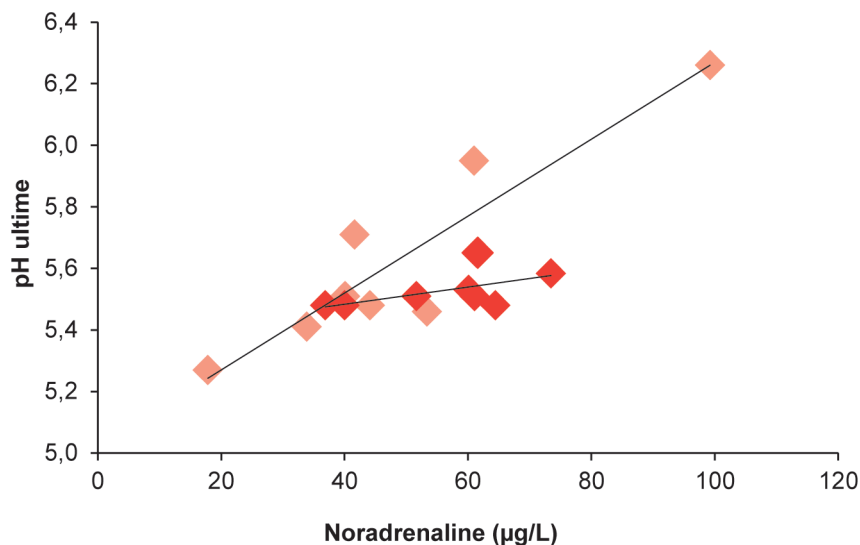
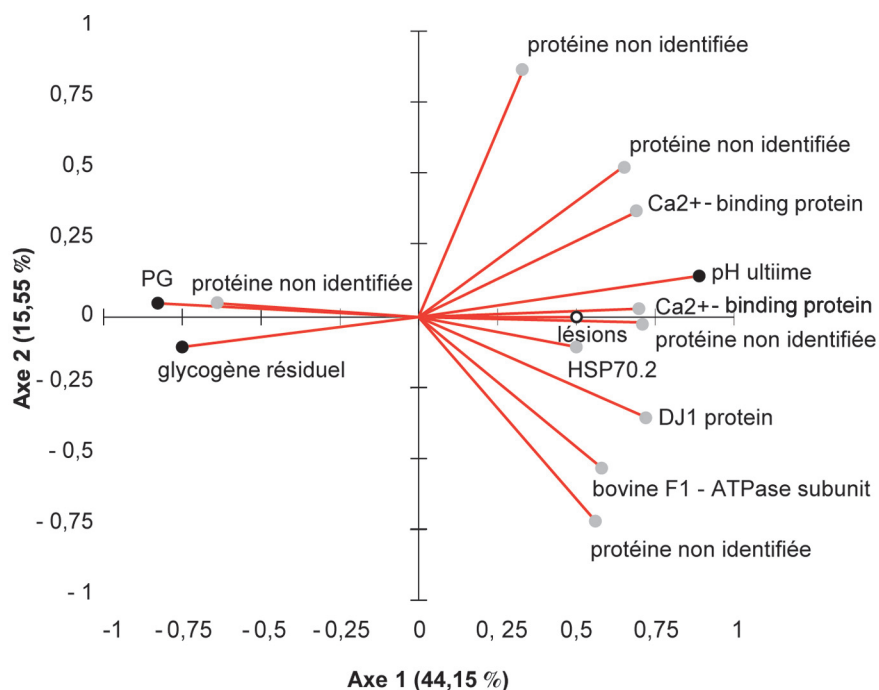


Figure 2a. Analyse en composantes principales des indicateurs reliés au pH ultime du Longissimus lumborum de porc.

Les symboles blancs, gris et noirs représentent les indicateurs liés au comportement, aux protéines et aux caractéristiques des viandes, respectivement. Le graphique montre que le pH ultime est plus élevé chez les animaux ayant plus de lésions et moins de glycogène musculaire. Il est également positivement corrélé avec des taux de protéines liées au métabolisme énergétique (CA2+ binding protein, F1-ATPase subunit) et à la protection des structures cellulaires (HSP70.2, DJ1 protein).



est plus élevé chez des porcs abattus après avoir été mélangés et hébergés toute la nuit en bouverie d'attente à l'abattoir, que chez des porcs non mélangés et abattus immédiatement après le transport (figure 1). Les mécanismes biologiques restent à élucider mais peu-

vent être liés aux efforts musculaires plus intenses des porcs du premier groupe liés aux combats. De plus, du fait du délai plus long avant l'abattage, la durée plus longue des effets combinés des efforts et des taux augmentés de noradrénaline peut avoir joué un rôle.

L'étude des mécanismes moléculaires peut être abordée par une approche protéomique, qui permet de mesurer l'abondance d'un grand nombre de protéines présentes dans le muscle au moment de l'abattage. L'analyse des corrélations entre ces abondances et certaines composantes de la qualité de la viande peut donner des indications concernant les mécanismes biochimiques impliqués. Nos analyses récentes (figure 2a) montrent qu'en dehors du niveau des réserves énergétiques (potentiel glycolytique,

réserves en glycogène) et de l'implication de certaines protéines non encore identifiées, le pH ultime dépend de l'abondance de protéines impliquées dans le métabolisme énergétique (Ca²⁺ « binding protein », F1-ATPase) ou dans la protection cellulaire (DJ-1 « protein », HSP70-2). La construction d'un modèle optimal par régression multiple, qui inclut 4 variables parmi celles considérées dans l'étude, permet d'expliquer près de 85% de la variabilité du pH ultime (figure 2b).

Figure 2b. Relation entre le pH ultime du *Longissimus lumborum* de porc estimé et le pH ultime mesuré.

Le pH estimé est calculé par l'équation suivante :

pH du LL à 24 h *p.m.* = 5,3 + 0,0003 * F1-ATPase + 0,0001 * protéine non-identifiée - 0,02 * glycogène résiduel 24 h *p.m.* + 0,00003 * HSP70-2 (r ajusté = 0,92 ; P < 0,0001).

Le modèle explique 84,6% de la variabilité du pH ultime du muscle *Longissimus lumborum* entre les porcs. (Pour les symboles, voir figure 1).

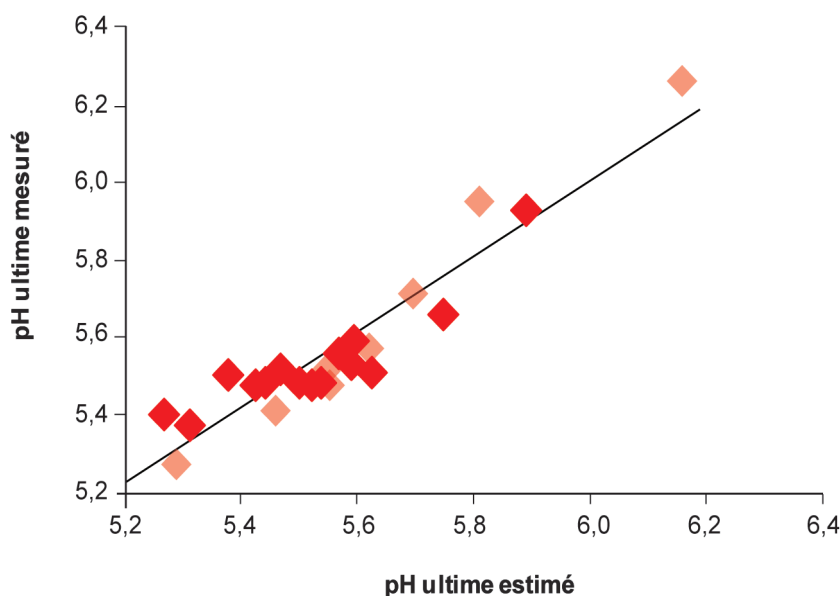
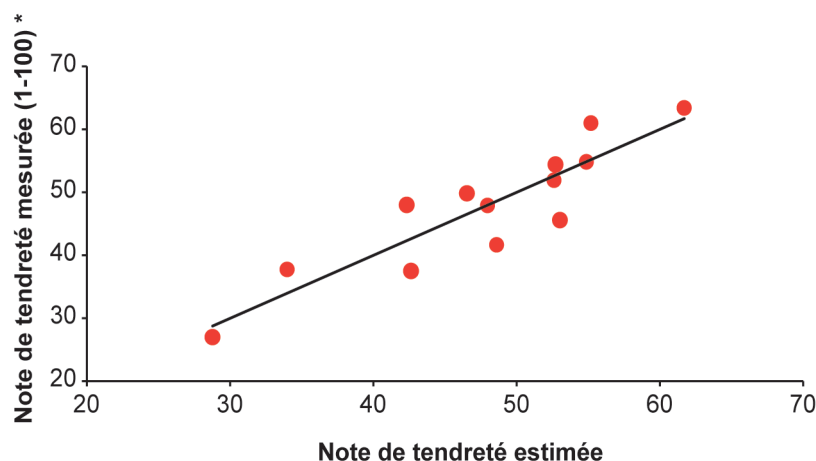


Figure 3. Relation entre la note de tendreté estimée et la note de tendreté mesurée dans le muscle *Longissimus thoracis* de vaches Normandes abattues dans des conditions de « stress ajouté ».

La note de tendreté estimée est calculée par l'équation suivante :

Intensité tendreté = 88,6 - 1,5 * % du temps « immobile en présence du soigneur » - 0,38 * % du temps « flairage de la grille » (r = 0,88 ; P = 0,0002).

Les différences comportementales expliquent 77,4% de la variabilité de tendreté entre les bovins.



* L'échelle de notation va de 1 (très dure) à 100 (très tendre)

En résumé, chez le porc, les réactions de stress à l'abattage sont en partie prévisibles en fonction de la réactivité des animaux à d'autres situations de stress. Les différences de réactivité entre animaux au stress d'abattage, qui dépendent de leur vécu et de leur patrimoine génétique, expliquent une part importante des variations de la qualité de la viande. En parallèle, les caractéristiques des muscles peuvent atténuer ou augmenter ces effets. Des analyses récentes relatives aux mécanismes sous-jacents à ces phénomènes confirment l'implication des hormones de stress et des protéines liées au métabolisme énergétique musculaire dans les effets du stress sur les qualités des viandes.

2 / Bovins

Chez les bovins, il est bien établi que certaines conditions d'abattage, telles que le mélange d'animaux ou le transport de longue durée, augmentent le risque de production de viandes à pH ultime élevé (Terlouw *et al* 2008). En revanche, contrairement au porc, le lien entre les réactions de stress juste avant la mise à mort de l'animal et la vitesse de diminution du pH *p.m.* sont des découvertes récentes. Ainsi, chez des vaches (Bourguet *et al* 2010) comme chez des taurillons (Terlouw *et al* 2012), plus la fréquence cardiaque est élevée durant les minutes qui précèdent l'abattage, plus la diminution du pH musculaire est rapide.

D'autres résultats montrent que le stress avant l'abattage peut influencer non seulement la vitesse de diminution du pH, mais aussi les qualités sensorielles des viandes bovines. Par exemple, l'utilisation de l'aiguillon électrique au cours de l'abattage était accompagnée de notes plus faibles des composantes de qualité sensorielle, y compris la tendreté, évaluées par des consommateurs (Warner *et al* 2007). Gruber *et al* (2010) ont montré un lien négatif entre les teneurs plasmatiques en lactate dans le sang de saignée et la tendreté, suggérant également que le stress juste avant l'abattage peut avoir des conséquences négatives sur la tendreté. Dans une autre expérience (Terlouw *et al* 2012), des vaches abattues dans des conditions de « stress minimisé » ont produit des viandes (muscle *Longissimus thoracis* ; LT) plus tendres (notes de 0 (dure) à 100 (tendre) : 54,3 ± 3,3) que celles abattues dans des conditions de « stress ajouté » (45,6 ± 2,7 ; P = 0,05).

Dans cette dernière expérience, les vaches avaient été caractérisées en termes de réactivité à l'Homme et à la séparation d'avec leurs congénères (Photos 1). Dans le groupe « stress ajouté », les vaches qui s'immobilisaient plus longtemps en présence d'un soigneur passif et qui pas-

Photos 1. Vaches Normandes dans les tests « réactivité à un humain passif » (gauche) et « séparation d'avec les congénères » (droite) (Bourguet et al 2010). Photo Inra – Cécile Bourguet.



saient plus de temps à flairer la grille derrière laquelle se trouvaient les congénères, présentaient une viande plus dure (figure 3). Ainsi, lorsqu'elles sont abattues en conditions de stress, les vaches plus réactives à l'Homme et à l'éloignement des congénères sont également plus réactives pendant l'abattage et présentent un risque supérieur d'altération de la tendreté de leur viande.

D'autres résultats de la même étude suggèrent que les mécanismes impliqués dans le déterminisme du stress varient selon les conditions d'abattage. Dans le groupe « stress ajouté », la température du muscle mesurée pendant les premières heures *p.m.* était négativement corrélée avec la tendreté. Ceci n'était pas retrouvé dans le groupe « stress minimisé » (figure 4). Ainsi, lorsque l'abattage se fait en conditions de « stress minimisé », même si les carcasses sont relativement chaudes entre 150 et 180 min après l'abattage, les viandes peuvent être relativement tendres. En revanche, lorsqu'il se fait en conditions de « stress ajouté », un refroidissement rapide de la carcasse est nécessaire pour obtenir une viande relativement tendre (en évitant toutefois le phénomène du « *cold shortening* », une contraction irréversible du muscle due au froid trop intense en début de période de refroidissement).

Une approche par des techniques génomiques permet de mieux comprendre les mécanismes moléculaires sous-jacents au déterminisme de la tendreté de la viande. Ainsi, des échantillons de muscle LT ont été soumis à une analyse transcriptomique à l'aide de la puce GENOTEND, contenant des sondes pour 3058 gènes (Cassar-Malek *et al* 2011, Hocquette *et al* 2012). Lorsque l'on considère uniquement les viandes produites par le groupe « stress ajouté », l'expression de 223 gènes (7,3%) est significativement corrélée avec la tendreté, majoritairement (221 gènes) de manière positive. En revanche, lorsque l'on considère les viandes produites par

le groupe « stress minimisé », l'expression de seulement 56 gènes (1,8%) est significativement corrélée ($P < 0,05$) avec la tendreté, majoritairement (50 gènes) positivement. Cette différence dans les résultats indique que dans le groupe « stress minimisé », la tendreté de la viande est relativement peu liée à l'expression des gènes étudiés.

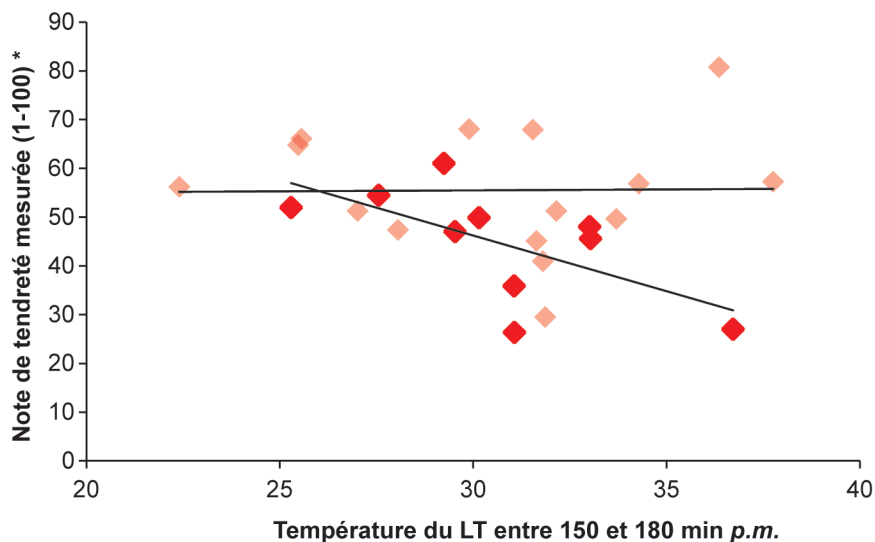
Pour connaître les mécanismes biologiques qui jouent un rôle dans l'attendrissage des viandes, une analyse des fonctions moléculaires et des processus dans lesquels sont impliqués ces gènes a été réalisée à l'aide de l'outil en ligne « Panther ». Les fonctions moléculaires et les processus biologiques ont été identifiés pour environ 90% des gènes étudiés. Les fonctions les plus représentées sont l'activité catalytique, les molécules de la liaison moléculaire, la structure. Par rapport à l'ensemble des gènes étudiés, dans le groupe « stress ajouté »,

pour les 223 gènes corrélés à la tendreté, les fonctions les plus représentées sont l'oxydoréduction et le transport cellulaire, les moins représentées étant celles liées à la structure, à la liaison moléculaire et à la régulation de la transcription. En termes de processus biologiques, le pourcentage de gènes dont le niveau d'expression est corrélé à la tendreté et qui sont liés à la chaîne respiratoire, la phosphorylation oxydative et au cycle de Krebs, est plus élevé que celui de l'ensemble des gènes étudiés. Ces résultats indiquent que le stress avant l'abattage diminue la tendreté de la viande, notamment chez les vaches pour lesquelles les gènes du métabolisme oxydatif sont faiblement exprimés au moment de l'abattage.

Dans le groupe « stress minimisé », peu de transcrits sont corrélés avec la tendreté, suggérant que lorsque le niveau de stress à l'abattage est limité, la varia-

Figure 4. Relations entre la température du muscle Longissimus thoracis entre 150 et 180 min *p.m.* et la note de tendreté selon les conditions d'abattage des bovins.

Bovins abattus avec stress ajouté (symboles rouges ; $r = -0,63$; $P = 0,04$), bovins abattus dans des conditions de stress minimisé (symboles roses ; $r = 0,01$; $P = \text{NS}$).



* L'échelle de notation va de 1 (très dure) à 100 (très tendre)

bilité de tendreté est liée à d'autres facteurs que l'expression des gènes détectés en conditions de stress. Le mécanisme biologique n'est pas encore connu mais il pourrait être lié à l'activité du système nerveux autonome, reflétée par l'activité cardiaque. Le système nerveux autonome influence le fonctionnement de l'ensemble des organes, y compris les muscles, à travers l'action de l'adrénaline, de la noradrénaline et de l'acétylcholine. Comme indiqué, les vaches de ce groupe ont en moyenne une meilleure note de tendreté de viande que celles du groupe « stress ajouté », leur viande étant d'autant plus tendre que leur fréquence cardiaque est faible pendant la période pré-abattage (figure 5a). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus chez des taurillons de différentes races, abattus dans des conditions de stress limité : une viande plus tendre est obtenue chez les taurillons présentant une fréquence cardiaque moins élevée que leurs congénères lors d'un test de stress émotionnel en élevage (figure 5b). L'augmentation de la fréquence cardiaque reflète une augmentation de l'activité de la branche orthosympathique du système nerveux autonome, potentiellement associée à une modification du métabolisme musculaire (Terlouw *et al* 2008).

Certains travaux suggèrent que des liens complexes pourraient exister entre le déclin du pH et les qualités sensorielles de la viande chez les bovins (Boudjellal *et al* 2008), mais dans les groupes « stress minimisé » et « stress ajouté » aucune relation entre la tendreté et l'évolution du pH *p.m.* n'a été observée.

Ces résultats montrent que comme chez le porc, les réactions de stress à l'abattage chez le bovin sont en partie prévisibles en fonction de leur réactivité à d'autres situations de stress, ces réactions pouvant influencer l'évolution *p.m.* du

pH. A l'heure actuelle nous manquons de connaissances sur les liens entre l'évolution du pH et la tendreté, en partie parce que les mécanismes impliqués varient en fonction de l'état physiologique ou de stress de l'animal. Une meilleure compréhension des effets du stress à l'abattage sur la réponse physiologique et biochimique des tissus permettra une meilleure maîtrise de la tendreté de la viande bovine.

3 / Ovins

Chez les ovins, la mise à jeun, les manipulations, le chargement et le déchargement du camion, le confinement, les perturbations sociales durant le transport et à l'abattoir sont des sources de stress qui peuvent détériorer les qualités des viandes (Terlouw *et al* 2008). Plusieurs études ont évalué les effets de différents aspects du transport sur les moutons. Le type de conduite (notamment les accélérations, les virages pris en grande vitesse et les freinages) influence le comportement des ovins. Une mauvaise conduite, notamment l'effort nécessaire pour éviter les pertes d'équilibre fatiguent les animaux (Cockram *et al* 2004). Les transports d'agneaux sur des routes secondaires ou non goudronnées sont associés à des augmentations plus prononcées de la teneur du cortisol plasmatique et de la fréquence cardiaque ainsi qu'à des pH ultimes plus élevés et des viandes plus rouges ou plus sombres, comparativement à un transport sur des routes de bonne qualité (Ruiz-de-la-Torre *et al* 2001, Miranda-de la Lama *et al* 2011b). La durée du transport influence les qualités des viandes. Comparés à des témoins non transportés ou transportés pendant seulement 1 h, des agneaux transportés pendant 8 ou 24 h produisent des viandes plus dures et plus rouges ou plus

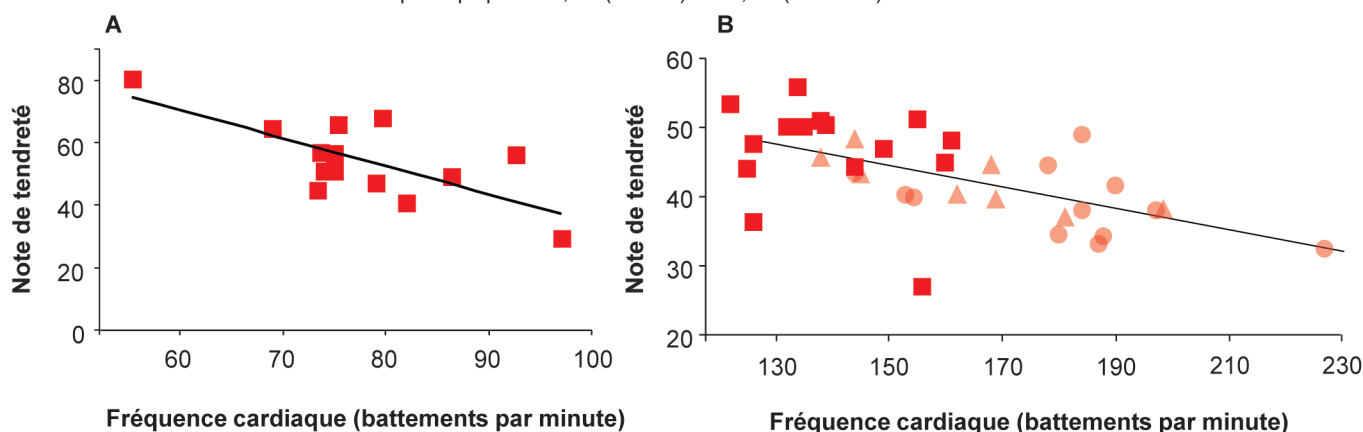
sombres (Zhong *et al* 2011, Dalmau *et al* 2012). Par ailleurs, les déplacements et les manipulations des ovins peuvent provoquer des ecchymoses sur la carcasse. Les causes principales de ces meurtrissures sont les chevauchements par des moutons situés à l'arrière du lot et qui tentent de s'éloigner des manipulateurs, les glissades et la préhension de la laine par les manipulateurs (Jarvis et Cockram 1995). Le passage par un marché avant l'abattoir augmente les manipulations et par conséquent le risque de meurtrissures sur la carcasse, mais les moutons arrivés directement de la ferme peuvent également présenter des pourcentages de meurtrissures élevés (Jarvis et Cockram 1994, 1995).

Les ovins passent parfois par des centres de tri où ils peuvent séjourner quelques heures mais parfois plusieurs semaines jusqu'à ce qu'ils aient atteint le poids d'abattage. Au terme de cette étape, les agneaux expriment de nombreux comportements agressifs, ainsi que des mâchonnements et des comportements stéréotypés (Miranda-de la Lama *et al* 2011a). Toutefois, la durée du séjour dans le centre de tri n'a pas d'effet notable sur le pH ultime, la flaveur, la jutosité ou la tendreté de la viande (Miranda-de la Lama *et al* 2009).

Une période d'attente à l'abattoir peut permettre aux agneaux de se reposer après le transport, si les conditions sont adaptées. Ainsi, des agneaux abattus immédiatement après leur arrivée à l'abattoir présentent des niveaux plasmatiques de cortisol, glucose et lactate plus élevés que ceux abattus 12 h après le transport. Ces augmentations sont probablement liées au stress et à l'effort pendant le transport, le chargement et le déchargement. En revanche, l'attente de 12 h est associée à des niveaux plasmatiques d'acides gras libres et de créatine-kinase

Figure 5. Relations entre la note de tendreté (abattage en conditions de « stress minimisé ») et la fréquence cardiaque mesurée (A) pendant les manipulations juste avant le départ de la ferme (vaches Normandes ; $r = -0,71$; $P = 0,004$) et (B) en réaction à un événement soudain pendant un test en élevage (taurillons de race Angus (■), Blonde d'Aquitaine (●) et Limousine (▲) ; $r = -0,59$; $P = 0,01$).

Ces différences dans la réactivité cardiaque expliquent 50,4% (vaches) et 35,8% (taurillons) de la variabilité de tendreté entre les animaux.



plus élevés, pouvant traduire les effets de la privation alimentaire et de la fatigue musculaire (Liste *et al* 2011). Les manipulations à l'abattoir peuvent aussi être source de stress émotionnel. L'utilisation d'un chien, des contacts directs avec le bouvier (animaux touchés, poussés) ou l'utilisation d'un sifflet pour déplacer les animaux sont corrélés positivement avec le niveau de cortisol plasmatique (Hemsworth *et al* 2011).

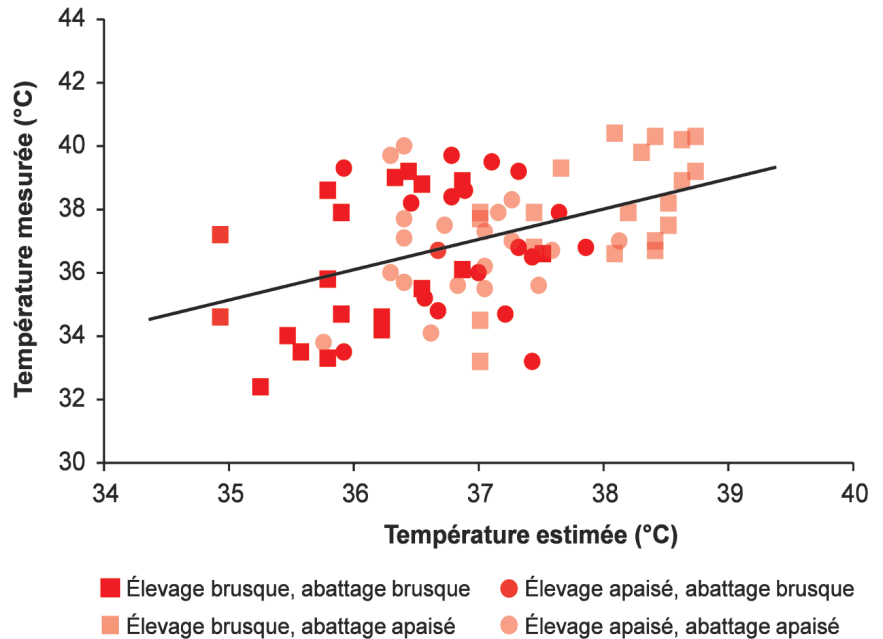
Comme chez les bovins et les porcs, des études récentes ont montré que les ovins sont cohérents dans leur réactivité émotionnelle (Boissy *et al* 2005, 2007) et que leurs réponses au stress pendant la période d'engraissement peuvent prédire leurs réactions à l'abattage. Par exemple, des agneaux plus vigilants lors d'une séparation sociale et d'une exposition à un environnement nouveau ont un niveau de cortisol sanguin à l'abattage plus bas et un pH musculaire 3 h *p.m.* plus élevé, par rapport à la moyenne du groupe (Deiss *et al* 2009). Les agneaux exprimant le plus de comportements sociaux et le plus de bêlements hauts (bêlements avec la bouche ouverte) pendant ces tests présentent des températures musculaires plus élevées 3 h *p.m.* (Deiss *et al* 2009). Dans une autre expérience, des agneaux étaient caractérisés au sevrage pour leur réactivité à l'Homme. Les individus extrêmes ont été sélectionnés, pour créer un groupe réactif à l'Homme (H+) et un groupe peu réactif à l'Homme (H-). Les agneaux sélectionnés ont été élevés puis abattus avec (« apaisé ») ou sans (« brusque ») ménagement, créant 8 groupes dans un plan expérimental équilibré. Les agneaux exprimant plus de bêlements hauts lors de la séparation d'avec leurs congénères dans des tests réalisés avant l'abattage avaient des températures musculaires *p.m.* plus élevées, pouvant indiquer un stress plus intense au moment de l'abattage (figure 6a). Les agneaux élevés sans ménagement avaient un pH ultime plus élevé que les autres groupes, suggérant un stress chronique, à l'exception des agneaux (H+) abattus dans des conditions apaisées (figure 6b ; Deiss *et al* en préparation). L'exception de ce dernier groupe est difficile à expliquer. Ces effets sont significatifs, mais globalement, l'impact de la réactivité au stress mesurée en élevage sur les qualités des viandes chez l'agneau est relativement faible (Deiss *et al* 2009). Il est possible que chez les ovins, d'autres paramètres aient un impact relativement fort sur les qualités des viandes. Par exemple, le pH ultime dépend aussi du poids de la carcasse (figure 6b). De plus, le stress social, lié à la séparation des congénères au cours de l'abattage peut varier fortement entre les individus et pourrait avoir un impact marqué sur les qualités des viandes (Deiss *et al* 2009).

Figure 6. (A) Relation entre la température estimée et la température du muscle Semimembraneux mesurée 15 min *p.m.* chez des ovins élevés et abattus dans des conditions brusques versus apaisées.

La température estimée est calculée par l'équation suivante :

$$\text{Température} = 35,8 + 0,11 \times \text{bêlements hauts lors de séparation} + 1,26 \times \text{élevage brusque/abattage apaisé}$$

Le modèle explique 16,1% de la variabilité dans la température musculaire entre les ovins.

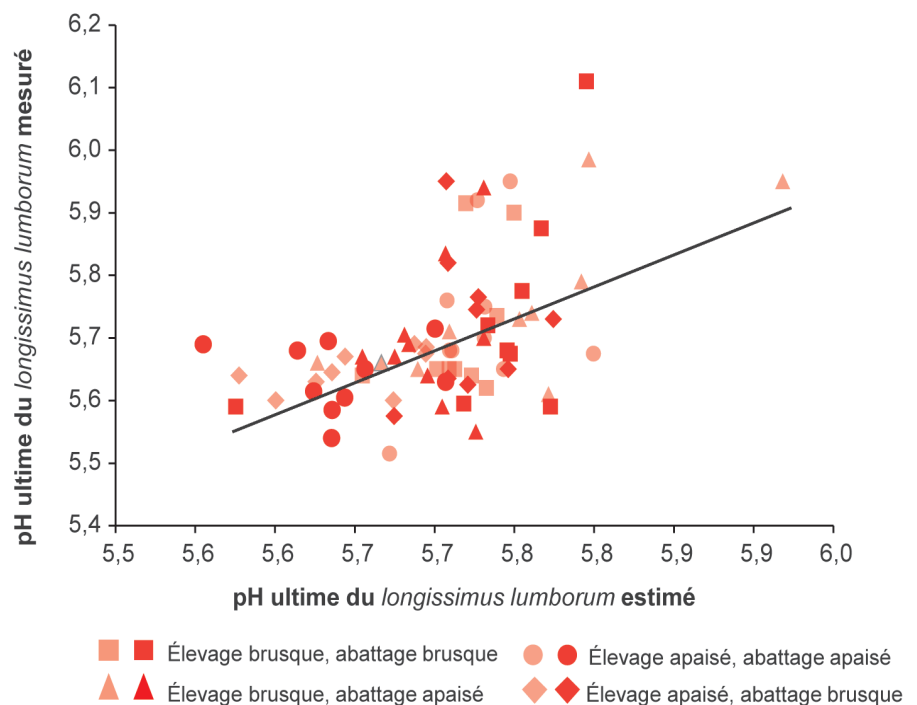


(B) Relation entre le pH ultime estimé et le pH ultime du muscle Longissimus lumborum mesuré chez des ovins élevés et abattus dans des conditions brusques versus apaisées.

Le pH estimé est calculé par l'équation suivante :

$$\text{pH ultime} = 6,04 - 0,02 \times \text{Pds carcasse} + 0,10 \times \text{H+}/\text{eleB}/\text{abatB} + 0,14 \times \text{H-}/\text{eleB}/\text{abatC} + 0,10 \times \text{H+}/\text{eleB}/\text{abatB}$$

Le modèle explique 17,5% de la variabilité dans le pH ultime entre les ovins.



Les symboles en rose et rouge représentent des ovins H- (peu réactifs à l'Homme) et des H+ (plutôt réactifs à l'homme), respectivement.

Ces résultats montrent que les conditions de transport et d'attente à l'abattoir, ainsi que la qualité des manipulations peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés musculaires et la qualité des viandes des ovins. Comme pour les porcs et les bovins, chez les ovins, la réactivité au stress de l'abattage est en partie prévisible en fonction des réactions à d'autres situations de stress et le vécu peut moduler cette réactivité. Les effets du stress au moment de l'abattage sur les qualités des viandes semblent cependant moins faciles à prévoir chez les ovins que chez les bovins et les porcins.

4 / Volaille

Chez la volaille, les principales causes de stress étudiées sont celles liées au transport, à l'attente à l'abattoir et à l'accrochage. Pendant le transport, les facteurs de stress potentiels sont multiples, comme les vibrations, les mouvements du camion, les impacts, les perturbations sociales, le bruit et le stress thermique (Mitchell et Kettlewell 2009). Le stress thermique est considéré comme un des stress les plus importants. Une étude a montré que la mortalité est fonction de la durée et surtout de la température pendant le transport, avec une température optimale comprise entre 10 et 15 °C (Nijdam *et al* 2004). L'attente des animaux à l'abattoir dans des conditions de température élevée provoque une augmentation du niveau de corticostérogène plasmatique (Debut *et al* 2005). L'humidité de l'air influence également le stress provoqué par des températures basses ou élevées (Mitchell et Kettlewell 1998). L'accrochage est une source de douleur et de peur (Kannan *et al* 1997, Gentle et Tilston 2000). L'accrochage provoque des vocalisations et des battements d'ailes qui peuvent induire des blessures et des fractures des ailes (Gregory et Wilkins 1989, Debut *et al* 2005). Il a été montré chez les oiseaux que plus la durée d'accrochage augmente, plus il est facile d'induire des réactions d'immobilité tonique, indicatrices de peur (Bedanova *et al* 2007). La durée de l'accrochage est également positivement corrélée avec les niveaux plasmatiques de corticostérogène, de glucose et de lactate (Kannan *et al* 1997, Debut *et al* 2005, Bedanova *et al* 2007).

Plusieurs études évaluent les effets des différents facteurs de stress sur les qualités des viandes de volaille. La privation alimentaire peut diminuer les teneurs en glycogène et influencer le pH, mais les résultats varient selon les muscles et les études. Chez le poulet, il a été montré qu'une privation d'une durée allant jusqu'à 36 h n'a aucun effet sur le pH ultime, mais accélère la vitesse de diminution

du pH (Kotula et Wang 1994). Dans d'autres études, une privation de 10 ou 12 h diminue les teneurs en glycogène et augmente le pH ultime du *biceps* (cuisse) sans effet sur le *pectoralis* (filet ; Warriss *et al* 1988, 1993). Les effets du transport sur les qualités des viandes dépendent également du muscle. Ainsi, un transport de 6 h augmente le pH ultime du *biceps* mais diminue celui du *pectoralis* (Warriss *et al* 1993). Ces oppositions s'expliquent en partie par des différences de type métabolique et de fonction physiologique entre ces deux muscles : le *biceps* est moins riche en glycogène et probablement plus sollicité pendant le transport afin de maintenir l'équilibre, que le *pectoralis* (Warriss *et al* 1993).

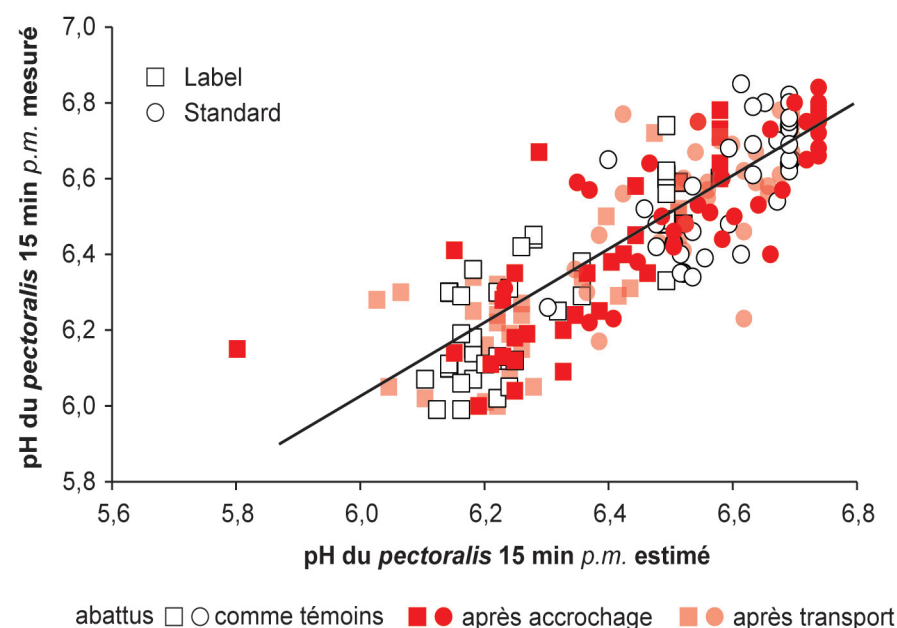
D'autres études ont évalué les effets du stress thermique à l'abattoir sur les qualités des viandes. L'exposition de poulets à des températures de plus de 30 °C avant l'abattage peut augmenter (Aksit *et al* 2006) ou diminuer (Debut *et al* 2003, Berri *et al* 2005, Schneider *et al* 2012) le pH ultime des filets et des cuisses. L'exposition à des températures en dessous de 0 °C avant l'abattage diminue les teneurs en glycogène du *pectoralis* de manière plus prononcée que dans le *biceps* et augmente la proportion de viandes à coupe sombre (Dadgar *et al* 2011, 2012). Lorsqu'on associe aux températures basses une période d'attente à l'abattoir de 2 h, la proportion de viandes à coupe sombre est encore plus élevée (Dadgar *et al* 2012).

Les réactions à l'accrochage peuvent également avoir un impact fort sur les qualités des viandes chez les poulets et les dindes (Papinaho *et al* 1995, Berri *et al* 2005). Une série d'études détaillées sur ces questions a été réalisée avec des poulets de différentes souches abattus sous différentes conditions afin d'intégrer l'impact de ces facteurs (Arnould, Berri et Duval résultats non publiés). Les analyses montrent que pour l'ensemble des souches, la durée des battements d'ailes explique entre 39 et 56% de la variabilité du pH précoce du *pectoralis* (15 min *p.m.*), selon l'étude. L'intégration des autres paramètres dans ces modèles a permis de tenir compte des effets de la souche et des conditions d'abattage. Ainsi, en considérant des poulets de différentes souches qui étaient soit accrochés pendant 10 s (stress limité), soit accrochés pendant 2 min (stress intermédiaire), soit exposés pendant 3,5 h à dans un environnement chaud et humide puis accrochés pendant 2 min (stress élevé), un modèle mathématique a été conçu. Ce modèle permet d'expliquer 60% de la variabilité du pH précoce du *pectoralis* des animaux (Debut *et al* 2005). Ce travail montre aussi que la diminution du pH est plus rapide chez les poulets de souche Label des groupes stress intermédiaire et élevé, et moins rapide chez les poulets de la souche lourde des groupes stress limité et intermédiaire. Les battements d'ailes accélèrent la diminution du pH *p.m.* chez l'ensemble des poulets. Dans une autre étude, des poulets de souches Standard

Figure 7. Relation entre le pH estimé et le pH du muscle pectoralis mesuré 15 min *p.m.* chez des poulets de différentes souches et selon différentes conditions d'abattage.

Le pH estimé est calculé par l'équation suivante qui explique 71,8% de la variabilité du pH entre les poulets :

$$\text{pH} = 6,74 - 0,02 \times \text{durée totale des battements} - 0,23 \times \text{souche Label/Chaleur} - 0,25 \times \text{souche Label/Témoin} - 0,16 \times \text{souche Label} \times \text{Transport}$$



et Label ont été abattus soit après 2 h de transport, soit après 2 h d'exposition à la chaleur (35°C) et comparés à des poulets abattus dans des conditions « témoin » (Debut *et al* 2003). Ces données ont permis d'établir un modèle qui explique 72% de la variabilité du pH précoce du *pectoralis* entre les animaux et confirment que les battements des ailes accélèrent la diminution du pH chez l'ensemble des poulets (figure 7). Par ailleurs, la diminution du pH est significativement plus rapide et la cinétique d'évolution du pH dépend plus des conditions d'abattage chez les poulets de souche Label, par rapport aux poulets de souche Standard. Ainsi, les facteurs qui favorisent une accélération de la diminution du pH sont d'ordre génétique (souche Label) et comportemental (battements des ailes), en particulier pour les groupes d'abattage « témoin » et « chaleur ». En outre, les poulets de souche Label ont tendance à battre plus longtemps les ailes que les poulets de souche Standard (interaction souche × conditions d'élevage $P < 0,001$, $11,8 \pm 0,7$ vs $5,9 \pm 0,6$ sec, Debut *et al* 2003) ce qui accélère d'autant plus la diminution du pH des poulets de souche Standard. Dans ces deux modèles, l'impact (coefficient normalisé) de la durée des battements d'ailes sur la vitesse de diminution du pH était 70 à 200% plus important que celui des autres facteurs (souche × conditions d'abattage).

L'ensemble de ces résultats montre que la vitesse d'évolution du pH du *pectoralis* est relativement sensible aux battements d'ailes qui activent le métabolisme musculaire. D'autres études ont montré des liens entre les réactions des animaux à l'accrochage et la couleur de la viande : chez le poulet, l'indice de rouge du *pectoralis* augmente avec la durée d'accrochage (Schneider *et al* 2012) et chez les dindes, la luminosité de ce muscle est plus basse lorsque celles-ci se débattent davantage pendant l'accrochage (Ngoka et Froning 1982).

Comme chez les mammifères, on a observé chez la volaille une constance dans les réactions de stress à différentes situations. Pour l'heure, hormis leur origine génétique, il n'y a pas encore d'indicateurs permettant de prédire la réactivité, en termes de battements des ailes, des oiseaux à l'accrochage. Par exemple, la note d'immobilité tonique établie pour chaque animal une semaine avant l'abattage n'est pas corrélée aux réactions à l'accrochage (Debut *et al* 2003). D'autres facteurs que la réactivité au stress, par exemple l'inconfort et la douleur, peuvent contribuer aux réactions à l'accrochage. L'utilisation de crochets flexibles et d'un tapis roulant sur lequel reposent les volatiles jusqu'à l'arrivée dans le bain d'élec-

tronarcose peut réduire les douleurs et le stress associés à cette procédure (Lines *et al* 2012).

Ces résultats montrent que pour la volaille, les sources de stress au cours du transport et de l'abattage, sont d'origine émotionnelle et physique, et comprennent entre autres la chaleur ambiante, la privation alimentaire et l'accrochage. Les réactions physiologiques et comportementales à ces facteurs de stress peuvent avoir des conséquences notables sur les qualités des viandes.

5 / Poissons

Confrontés à des situations supposées stressantes, les poissons ont des réponses physiologiques similaires à celles des mammifères, comme des réponses de fuite et des élévations de teneur en cortisol plasmatique. Toutefois, les poissons ne possèdent qu'une petite partie des structures cérébrales classiquement impliquées dans l'expérience des émotions chez les mammifères (Huntingford *et al* 2006, Sneddon 2009). Par conséquent, la capacité des poissons à ressentir des émotions est sujette au débat. Ces auteurs indiquent que des structures cérébrales autres que celles connues chez les humains et les mammifères, peuvent permettre aux poissons de ressentir des émotions négatives (Ashley 2007).

Les sources de stress liées à l'abattage varient selon les espèces de poisson et les structures d'élevage (Terlouw *et al* 2008). Les causes de stress avant l'abattage sont liées au regroupement, aux conditions de transport et d'attente (durées, densité des poissons et qualité de l'eau), et à l'extraction des poissons de leur environnement aquatique pour l'étourdissement ou la mise à mort. Il existe différentes méthodes d'étourdissement : la percussion, l'anesthésie gazeuse par CO₂, l'électrocution, le refroidissement et le « *spiking* » (perforation du cerveau). L'utilisation de l'asphyxie, qui provoque la mort, est plus rare, car considérée comme non respectueuse du bien-être animal (Van de Vis *et al* 2003). Ces différentes méthodes influencent également l'état de stress. Les réactions physiologiques et l'activité musculaire associées au stress influencent l'évolution biochimique du muscle *p.m.*, comme la diminution du pH et le délai d'installation de la *rigor mortis*. Par exemple, chez des saumons, plus le transport vers l'abattoir est long, plus le pH précoce est bas (Gatica *et al* 2008). De même, des saumons et des truites soumis à un effort physique avant l'abattage présentent une diminution du pH et une installation de la *rigor mortis* plus rapides que des témoins (Thomas *et al* 1999, Erikson et Misimi 2008). Une accélération des évolutions biochimiques

dans le muscle *p.m.* après un abattage stressant a été observée chez la plupart des espèces étudiées (Marx *et al* 1997, Morzel *et al* 2003, Lefèvre *et al* 2008a).

Les conditions d'abattage peuvent influencer le pH ultime. L'augmentation de la densité des saumons 24 h avant l'abattage est associée à une baisse de glycogène musculaire et un pH plus élevé 5 et 14 jours après l'abattage (Skjervold *et al* 2001). Les conditions d'abattage peuvent également influencer la couleur. Cet effet peut être visible sur les filets des espèces à chair pigmentée, comme les salmonidés, mais aussi sur la peau des poissons entiers. L'effet sur la couleur des filets est le plus souvent négatif (chair moins lumineuse et moins colorée, Lefèvre *et al* 2008a). Parfois, les changements de couleur sont directement liés à la méthode d'abattage qui peut gêner l'efficacité de la saignée (CO₂, électricité) (Kiessling *et al* 2004).

Le stress avant l'abattage peut aussi influencer la texture. Des saumons anesthésiés au CO₂ présentent une texture moins ferme que des témoins anesthésiés à l'iso-eugénol (Kiessling *et al* 2004). Cet effet pourrait être lié à des altérations des structures musculaires, en particulier de la jonction myotendineuse (Bahaud *et al* 2010), en lien avec une augmentation de certaines activités protéolytiques. Des études protéomiques ont révélé que des protéines de structure (myosine, actine, tropomyosine, desmine, cap Z) et des enzymes métaboliques sont affectées par l'anesthésie au CO₂ (Morzel *et al* 2006, Veiseth-Kent *et al* 2010) et pourraient expliquer l'altération qualitative de la chair. De même, l'hypoxie avant l'abattage provoque une augmentation de la perte en eau chez des morues (Bjornevik et Solbakken 2010). Des carpes, des anguilles et des truites anesthésiées au CO₂ présentent de moins bonnes notes sensorielles que des témoins abattus par percussion (Marx *et al* 1997). Toutefois, les effets sur le pH ou les caractéristiques sensorielles peuvent disparaître 8 à 14 jours *p.m.* (Skjervold *et al* 2001, Bjornevik et Solbakken 2010).

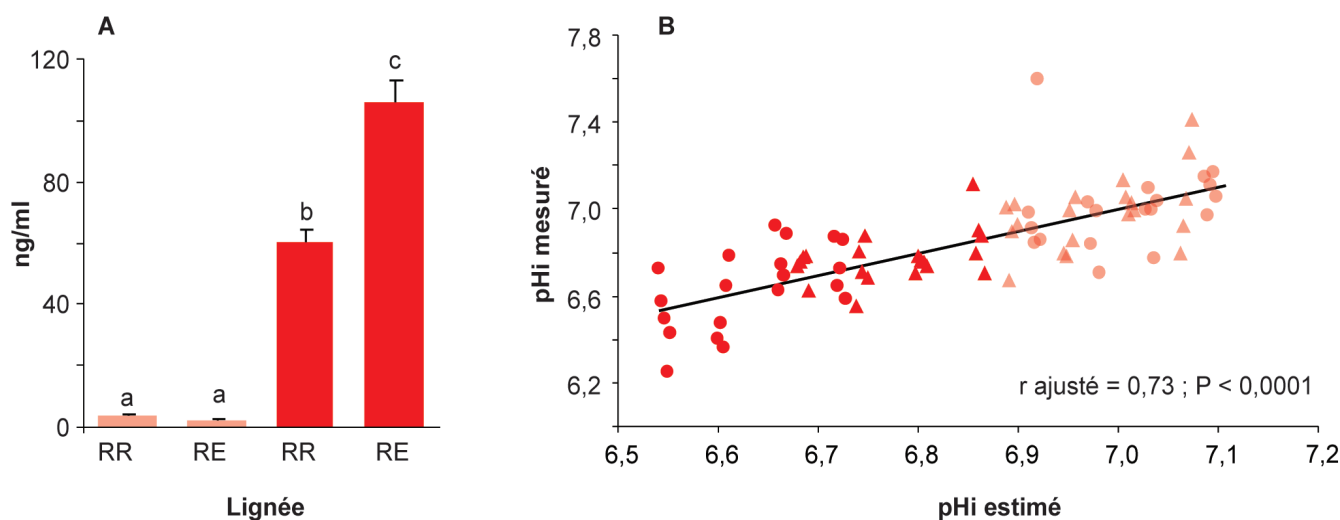
Très peu d'études se sont intéressées aux liens potentiels entre la réactivité au stress des poissons en élevage, leurs réactions au stress à l'abattage et la qualité des produits. La composante génétique dans la réactivité au stress émotionnel a été démontrée grâce à la sélection de lignées divergentes de truites pour leur réponse en cortisol plasmatique suite à un stress émotionnel aigu de confinement (Lefèvre *et al* 2008b). L'application d'un stress supplémentaire à l'abattage induit une augmentation du taux de cortisol plasmatique significativement plus prononcée pour la lignée plus réactive (figure 8a). Le pH initial

Figure 8. Taux de cortisol plasmatique des truites à l'abattage A) et relation entre le pH initial estimé et mesuré B).

Le pH estimé est calculé par l'équation suivante qui explique 53,3% de la variabilité du pH_i entre les truites :

$$\text{pHi} = 6,8 - 0,003 * \text{ordre abattage} + 0,1 * \text{RE} + 0,4 * \text{NS} - 0,2 * \text{RE} * \text{NS}$$

Significations des symboles : Abattage sans (rose ; NS) ou avec (rouge ; SS) un stress supplémentaire. Lignées de réactivité au stress élevée (RE, triangles) ou réduite (RR, cercles). a, b, c : Les valeurs des barres dont les lettres différent sont significativement différentes, $P < 0,0001$.



est plus bas chez le groupe soumis au stress supplémentaire par rapport au groupe témoin. Toutefois, l'effet du stress sur le pH est moins prononcé chez la lignée plus réactive (figure 8b) peut-être à cause d'un facteur limitant tel qu'une moindre réserve en glycogène musculaire due aux réactions de stress pendant l'élevage ou au cours de l'abattage (Lefèvre *et al* 2008b).

En conclusion, à l'heure actuelle, les études réalisées sur les questions de stress à l'abattage et de qualité de la chair des poissons concernent surtout les facteurs de stress liés aux contraintes physiques imposées par l'abattage, telles que la qualité de l'eau ou l'activité physique due aux manipulations. Les résultats montrent que le stress au moment de l'abattage peut avoir des effets significatifs sur les qualités technologiques et sensorielles, qui semblent principalement dus à des modifications des processus d'évolution biochimique et structurale dans le muscle *p.m.*.

6 / Discussion générale et conclusion

Les travaux réalisés depuis de nombreuses années dans le domaine de la transformation du muscle en viande et la mise en évidence de facteurs génétiques ou environnementaux influençant cette évolution ont permis de limiter la production de viandes de types PSE et DFD dans les différentes espèces. Même s'il y a encore des progrès à faire pour limiter les défauts majeurs de qualité des produits, un enjeu important des recherches actuelles est de mieux connaître les mécanismes impliqués dans les effets du stress sur les qualités des viandes

afin de mieux les maîtriser. Si les causes de stress à l'abattage varient en fonction de l'espèce, toutes les espèces considérées ici sont sensibles au stress pré-abattage et au stress d'abattage avec un impact significatif sur la qualité des produits. Les mécanismes impliqués dans les effets du stress montrent des similitudes entre espèces, notamment relativement à l'impact du stress sur le métabolisme énergétique *p.m.* et par ce biais, sur la couleur. Cependant, les sources de stress à l'abattage, les critères pour une qualité de produit optimale, ainsi que les mécanismes moléculaires impliqués dans le déterminisme des qualités sensorielles, diffèrent selon les espèces. En conséquence, la problématique de l'impact du stress autour de l'abattage sur la qualité doit être considérée par espèce.

Notre revue des résultats les plus récents montre que l'approche statistique par régression peut être utile pour identifier des corrélations entre la réactivité au stress en élevage, les réactions aux conditions d'abattage et certaines caractéristiques des viandes, comme l'évolution du pH. Cette approche doit être toutefois employée avec précaution : l'identification d'une corrélation, notamment si elle se confirme dans plusieurs études, indique qu'il y a un lien entre les variables concernées, mais à l'inverse l'absence de corrélation ne signifie pas une absence de lien ; des relations peuvent exister mais ne pas être détectées si d'autres facteurs interviennent également. Nos résultats indiquent que la tendreté est corrélée à l'évolution de la température *p.m.*, uniquement chez les bovins stressés avant l'abattage. De même, la corrélation entre la noradrénaline urinaire et le pH ultime de la viande est plus forte chez les porcs mélangés et transportés la veille de l'abattage.

L'implication de plusieurs facteurs dans ces phénomènes peut expliquer pourquoi les corrélations entre deux mêmes variables peuvent être différentes selon les circonstances. Par exemple, pour le muscle *Semitenndinosus* (rond de gîte) de type rapide glycolytique, les données bibliographiques montrent qu'en cas de stress minimal en période d'abattage, plus la proportion de fibres blanches est élevée plus la viande est tendre (Guillemin *et al* 2012). Or, ces fibres ont une plus grande capacité à accélérer leur métabolisme lors d'un stress juste avant l'abattage (Hambrecht *et al* 2005), ce qui selon nos résultats aurait des conséquences négatives sur la tendreté ultérieure de la viande. Ainsi, nous pouvons postuler que plus le muscle *Semitenndinosus* est riche en fibres blanches plus son potentiel à produire une viande tendre serait élevé, mais plus il serait sensible aux effets négatifs du stress avant l'abattage sur la tendreté, comme illustré dans la figure 9a. Par conséquent, au sein d'un lot d'animaux ayant une composition en fibres assez similaire et à prédominance blanche, on s'attend à observer une corrélation négative entre le niveau de stress et la tendreté (figure 9b). Si les muscles sont de type rouge oxydatif, donc moins sensibles aux effets négatifs du stress, on s'attend à ce qu'il n'y ait pas cette corrélation (figure 9c). Ainsi, lorsque les animaux abattus présentent des muscles de composition variable, nous pouvons supposer qu'en conditions de stress limité, on aura une corrélation positive entre le pourcentage de fibres blanches et la tendreté (figure 9d) alors qu'en conditions de stress cette corrélation sera négative (figure 9e). Cet exemple illustre que la multiplicité des facteurs impliqués peut être à l'origine de différences inter- et intra-études

sur les relations identifiées entre les caractéristiques musculaires et les paramètres de la qualité de la viande.

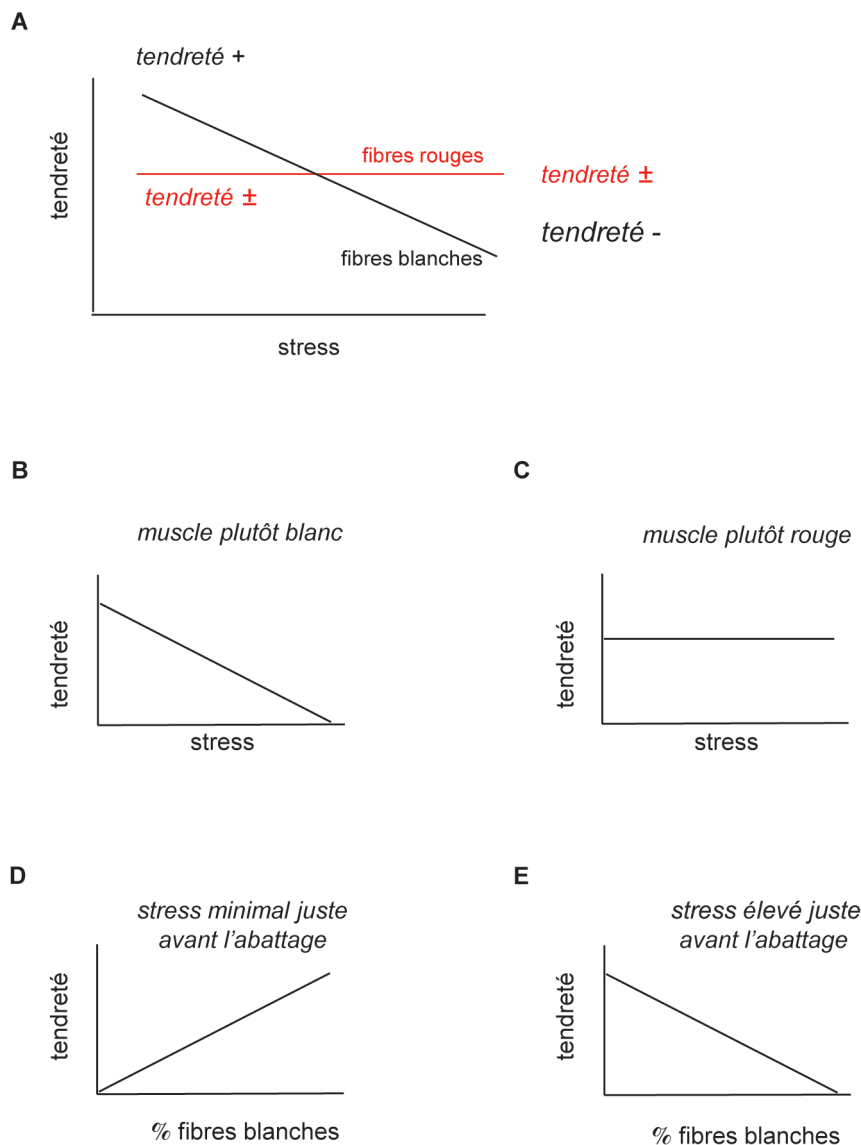
En conclusion, les conditions d'abattage doivent être adaptées au mieux à

chaque espèce, voire chaque race ou souche, en tenant compte du mode d'élevage, non seulement pour optimiser les qualités des produits mais aussi pour respecter le bien-être des animaux. Des études visant à mieux comprendre la

réactivité au stress des animaux doivent être poursuivies pour atteindre cet objectif, en considérant simultanément le patrimoine génétique, l'environnement d'élevage, l'environnement pré-abattage et leurs interactions.

Figure 9. Illustration de l'inversion de corrélations dans un cas où 2 variables (composition en fibres du muscle et niveau de stress juste avant l'abattage) sont liées à une autre variable (la tendreté). Cet exemple est basé sur des liens dont l'existence reste à confirmer.

- (A). Représentation des effets négatifs du stress sur la tendreté d'un muscle (blanc) alors qu'un autre muscle (rouge) peut être peu influencé.
 (B). Muscle plutôt blanc : Corrélation négative entre le niveau de stress juste avant l'abattage et la tendreté.
 (C). Muscle plutôt rouge : Absence de corrélation entre le niveau de stress juste avant l'abattage et la tendreté.
 (D). Abattage avec un niveau de stress limité : Corrélation positive entre le pourcentage de fibres blanches et la tendreté.
 (E). Abattage avec niveau de stress élevé : Corrélation négative entre le niveau de stress juste avant l'abattage et la tendreté.



Références

Aksit M., Yalcin S., Ozkan S., Metin K., Ozdemir D., 2006. Effects of temperature during rearing and crating on stress parameters and meat quality of broilers. *Poult. Sci.*, 85, 1867-1874.

Anon 2009. La révolution génomique animale. Ouvrage collectif coordonné par l'Institut de l'élevage et l'Inra. Edition France Agricole, Paris, France, 101-106.

Ashley P.J., 2007. Fish welfare: Current issues in aquaculture. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 104, 199-235.

Bahuaud D., Morkore T., Ostbye T.K., Veiseth-Kent E., Thomassen M.S., Ofstad R., 2010. Muscle structure responses and lysosomal cathepsins B and L in farmed Atlantic salmon

(*Salmo salar L.*) pre- and post-rigor fillets exposed to short and long-term crowding stress. *Food Chem.*, 118, 602-615.

Barton Gade P., 2008. Effect of rearing system and mixing at loading on transport and lairage behaviour and meat quality: comparison of outdoor and conventionally raised pigs. *Animal*, 2, 902-911.

- Bedanova I., Voslarova E., Chloupek P., Pistekova V., Suchy P., Blahova J., Dobsikova R., Vecerek V., 2007. Stress in broilers resulting from shackling. *Poult. Sci.*, 86, 1065-1069.
- Berri C., 2015. La viande de volaille : des attentes pour la qualité qui se diversifient et des défauts spécifiques à corriger. In : Numéro special, Le muscle et la viande. Picard B., Lebret B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, pages
- Berri C., Debut M., Sante-Lhoutellier V., Arnould C., Boutten B., Sellier N., Baeza E., Jehl N., Jego Y., Duclos M.J., Le Bihan-Duval E., 2005. Variations in chicken breast meat quality: implications of struggle and muscle glycogen content at death. *Br. Poult. Sci.*, 46, 572-579.
- Bjørnevik M., Solbakken V., Preslaughter stress and subsequent effect on flesh quality in farmed cod. *Aquacult. Res.*, 41, e467-e474.
- Boissy A., Bouix J., Orgeur P., Poindron P., Bibe B., Le Neindre P., 2005. Genetic analysis of emotional reactivity in sheep: effects of the genotypes of the lambs and of their dams. *Genet. Select. Evol.*, 37, 381-401.
- Boissy A., Manteuffel G., Jensen M.B., Moe R.O., Spruijt B., Keeling L.J., Winckler C., Forkman B., Dimitrov I., Langbein J., Bakken M., Veissier I., Aubert A., 2007. Assessment of positive emotions in animals to improve their welfare. *Physiol. Behav.*, 92, 375-397.
- Boudjellal A., Becila S., Coulis G., Herrera-Mendez C.H., Aubry L., Lepetit J., Harhoura K., Sentandreu M.A., Ait-Amar H., Ouali A., 2008. Is the pH drop profile curvilinear and either monophasic or polyphasic? Consequences on the ultimate bovine meat texture. *Afr. J. Agric. Res.*, 3, 195-204.
- Bourguet C., Deiss V., Gobert M., Durand D., Boissy A., Terlouw E.M.C., 2010. Characterising the emotional reactivity of cows to understand and predict their stress reactions to the slaughter procedure. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 125, 9-21.
- Cassar-Malek I., De La Foye A., Cherfaoui M., Jurie C., Terlouw C., Durand D., Hocquette J.F., 2011. Modifications du transcriptome musculaire en réponse au stress avant l'abattage chez les bovins. *Renc. Rech. Rum.*, 18, 205.
- Cheah K.S., Cheah A.M., 1981. Mitochondrial calcium transport and calcium-activated phospholipase in porcine malignant hyperthermia. *Biochim. Biophys. Acta.*, 634, 70-84.
- Cockram M.S., Baxter E.M., Smith L.A., Bell S., Howard C.M., Prescott R.J., Mitchell M.A., 2004. Effect of driver behaviour, driving events and road type on the stability and resting behaviour of sheep in transit. *Anim. Sci.*, 79, 165-176.
- Dadgar S., Lee E.S., Leer T.L.V., Crowe T.G., Classen H.L., Shand P.J., 2011. Effect of acute cold exposure, age, sex, and lairage on broiler breast meat quality. *Poult. Sci.*, 90, 444-457.
- Dadgar S., Crowe T.G., Classen H.L., Watts J.M., Shand P.J., 2012. Broiler chicken thigh and breast muscle responses to cold stress during simulated transport before slaughter. *Poult. Sci.*, 91, 1454-1464.
- Dalmau A., Di Nardo A., Realini C.E., Temple D., Llonch P., Velarde A., Rodriguez P., Messori S., Dalla Villa P., 2012. Effect of the duration of road transport on the physiology and meat quality of lambs. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 179-186.
- Debut M., Berri C., Baéza E., Sellier N., Arnould C., Guémené D., Jehl N., Boutten B., Jego Y., Beaumont C., Le Bihan-Duval E., 2003. Variation of chicken technological meat quality in relation to genotype and preslaughter stress conditions. *Poult. Sci.*, 82, 1829-1838.
- Debut M., Berri C., Arnould C., Guemene D., Sante-Lhoutellier V., Sellier N., Baeza E., Jehl N., Jego Y., Beaumont C., Le Bihan-Duval E., 2005. Behavioural and physiological responses of three chicken breeds to pre-slaughter shackling and acute heat stress. *Br. Poult. Sci.*, 46, 527-535.
- Deiss V., Temple D., Ligout S., Racine C., Bouix J., Terlouw C., Boissy A., 2009. Can emotional reactivity predict stress responses at slaughter in sheep? *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 119, 193-202.
- Deiss V., Bourguet C., Fassier T., Lullier M., Terlouw E.M.C., Boissy A., 2012. Reduction of stress reactions of lambs at slaughter by improving their reactivity to human beings. *Anim. Welf.*, 21, 153.
- EFSA, 2004. Welfare aspects of the castration of pigs. *European Food Safety - AHAW/04-087*.
- Erikson U., Misimi E., 2008. Atlantic salmon skin and fillet color changes effected by perimortem handling stress, rigor mortis, and ice storage. *J. Food Sci.*, 73, C50-59.
- Febbraio M.A., Lambert D.L., Starkie R.L., Proietto J., Hargreaves M., 1998. Effect of epinephrine in trained men. *J. Appl. Physiol.*, 84, 465-470.
- Foury A., Devillers N., Sanchez M.P., Griffon H., LeRoy P., Mormède P., 2005. Stress hormones, carcass composition and meat quality in Large White X Duroc pigs. *Meat Sci.*, 69, 703-707.
- Foury A., Lebret B., Chevillon P., Vautier A., Terlouw C., Mormède P., 2011. Alternative rearing systems in pigs: consequences on stress indicators at slaughter and meat quality. *Animal*, 5, 1620-1625.
- Fuji J., Otsu K., Zorzato F., de Leon S., Khanna V.K., Weiler J.E., O'Brien P.J., MacLennan D.H., 1991. Identification of a mutation in porcine ryanodine receptor associated with malignant hyperthermia. *Science*, 253, 448-451.
- Gatica M.C., Monti G., Gallo C., Knowles T.G., Warriss P.D., 2008. Effects of well-boat transportation on the muscle pH and onset of rigor mortis in Atlantic salmon. *Vet. Rec.*, 163, 111-116.
- Gentle M.J., Tilston V.L., 2000. Nociceptors in the legs of poultry: Implications for potential pain in pre-slaughter shackling. *Anim Welf*, 9, 227-236.
- Gregory N.G., Wilkins L.J., 1989. Broken Bones in Domestic-Fowl - Handling and Processing Damage in End-of-Lay Battery Hens. *Br. Poult. Sci.*, 30, 555-562.
- Gruber S.L., Tatum J.D., Engle T.E., Chapman P.L., Belk K.E., Smith G.C., Relationships of behavioral and physiological symptoms of preslaughter stress to beef longissimus muscle tenderness. *J. Anim. Sci.*, 88, 1148-1159.
- Guillemin N.P., Jurie C., Renand G., Hocquette J.F., Micol D., Lepetit J., Picard, B., 2012. Different phenotypic and proteomic markers explain variability of beef tenderness across muscles. *Int. J. Biol.*, 4, 26-38.
- Hambrecht E., Eissen J.J., Newman D.J., Smits C.H.M., Verstegen M.W.A., den Hartog L.A., 2005. Preslaughter handling effects on pork quality and glycolytic potential in two muscles differing in fiber type composition. *J. Anim. Sci.*, 83, 900-907.
- Hemsworth P.H., Rice M., Karlen M.G., Calleja L., Barnett J.L., Nash J., Coleman G.J., 2011. Human-animal interactions at abattoirs: Relationships between handling and animal stress in sheep and cattle. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 135, 24-33.
- Hocquette J.F., Bernard-Capel C., Vidal V., Jesson B., Leveziel H., Renand G., Cassar-Malek I., 2012. The GENOTEND chip: a new tool to analyse gene expression in muscles of beef cattle for beef quality prediction. *BMC Vet. Res.*, 8, 135-145.
- Huntingford F.A., Adams C., Braithwaite V.A., Kadri S., Pottinger T.G., Sandøe P., Turnbull J.F., 2006. Current issues in fish welfare. *J. Fish Biol.*, 68, 332-372.
- Jarvis A.M., Cockram M.S., 1994. Effects of handling and transport on bruising of sheep sent directly from farms to slaughter. *Vet. Rec.*, 135, 523-527.
- Jarvis A.M., Cockram M.S., 1995. Handling of sheep at markets and the incidence of bruising. *Vet. Rec.*, 582-585.
- Jeleniková J., Pipek P., Miyahara M., 2008. The effects of breed, sex, intramuscular fat and ultimate pH on pork tenderness. *Eur. Food Res. Technol.*, 227, 989-994.
- Jensen J., Aslesen R., Jebens E., Skrondal A., 1999. Adrenaline-mediated glycogen phosphorylase activation is enhanced in rat soleus muscle with increased glycogen content. *Biochim. Biophys. Acta*, 1472, 215-221.
- Kannan G., Heath J.L., Wabeck C.J., Mench J.A., 1997. Shackling of broilers: effects on stress responses and breast meat quality. *Br. Poult. Sci.*, 38, 323-332.
- Kiessling A., Espe M., Ruohonen K., Morkore T., 2004. Texture, gaping and colour of fresh and frozen Atlantic salmon flesh as affected by pre-slaughter iso-eugenol or CO₂ anaesthesia. *Aquaculture*, 236, 645-657.
- Kotula, K.L., Wang Y., 1994. Characterization of broiler meat quality factors as influenced by feed withdrawal time. *J. Appl. Poult. Res.*, 3, 103-110
- Lawrence A.B., Terlouw E.M.C., Illius A.W., 1991. Individual differences in behavioural responses of pigs exposed to non-social and social challenges. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 30, 73-86.
- Le Bihan-Duval E., Debut M., Berri C.M., Sellier N., Sante-Lhoutellier V., Jego Y., Beaumont C., 2008. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genet.*, 9, 53.
- Lebret B., 2008. Effects of feeding and rearing systems on growth, carcass composition and meat quality in pigs. *Animal*, 2, 1548-1558.
- Lebret B., Faure J., 2015. La viande et les produits du porc : comment satisfaire des attentes qualitatives variées ? In : Numéro spécial, Le muscle et la viande. Picard B., Lebret B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, 111-114.

- Lebret B., Meunier-Salaun M.C., Foury A., Mormède P., Dransfield E., Dourmad J.Y., 2006. Influence of rearing conditions on performance, behavioral, and physiological responses of pigs to preslaughter handling, carcass traits, and meat quality. *J. Anim. Sci.*, 84, 2436-2447.
- Lebret B., Prunier A., Bonhomme N., Foury A., Mormède P., Dourmad J.Y., 2011. Physiological traits and meat quality of pigs as affected by genotype and housing system. *Meat Sci.*, 88, 14-22.
- Lebret B., Delgado-Andrade C., Claude S., Prunier A., 2012. Qualité de la viande de porcs mâles entiers, castrés ou immunocastrés : influence de la conduite pré-abattage. *Journ. Rech. Porcine*, 44, 49-50.
- Lefèvre F., Bugeon J., Auperin B., Aubin J., 2008a. Rearing oxygen level and slaughter stress effects on rainbow trout flesh quality. *Aquaculture*, 284, 81-89.
- Lefèvre F., Cos I., Pottinger T.G., Bugeon J., 2008b. Sélection génétique sur la réponse au stress et stress à l'abattage: Conséquences sur la qualité de la chair chez la truite arc-en-ciel. *Viandes Prod. Carnés, Hors-série*, 177-178.
- Lines J.A., Berry P., Cook P., Schofield C.P., Knowles T.G., 2012. Improving the poultry shackle line. *Anim. Welf.*, 21, 69-74.
- Liste G., Miranda-de la Lama G.C., Campo M.M., Villarreal M., Muela E., Maria G.A., 2011. Effect of lairage on lamb welfare and meat quality. *Anim. Prod. Sci.*, 51, 952-958.
- Marx H., Brunner B., Weinzierl W., Hoffmann R., Stolle A., 1997. Methods of stunning freshwater fish: impact on meat quality and aspects of animal welfare. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.*, 204, 282-286.
- Meunier-Salaun M.C., Dourmad J.Y., Lebret B., 2006. Evaluation comparée de deux systèmes d'élevage par la réponse comportementale des porcs à l'introduction d'un nouvel objet dans le milieu de vie. *Journ. Rech. Porcine*, 38, 417-422.
- Miranda-de la Lama G.C., Villarreal M., Olleta J.L., Alierta S., Sanudo C., Maria G.A., 2009. Effect of the pre-slaughter logistic chain on meat quality of lambs. *Meat Sci.*, 83, 604-609.
- Miranda-de la Lama G.C., Villarreal M., Maria G.A., 2011a. Behavioural and physiological profiles following exposure to novel environment and social mixing in lambs. *Small Rum. Res.*, 103, 158-163.
- Miranda-de la Lama G.C., Monge P., Villarreal M., Olleta J.L., Garcia-Belenguer S., Maria G.A., 2011b. Effects of road type during transport on lamb welfare and meat quality in dry hot climates. *Trop. Anim. Health Prod.*, 43, 915-922.
- Mitchell M., Kettlewell P., 1998. Physiological stress and welfare of broiler chickens in transit: solutions not problems! *Poult. Sci.*, 77, 1803-1814.
- Mitchell M.A., Kettlewell P.J., 2009. Welfare of poultry during transport – a review. *Poult. Welfare Symp.*, Cervia, Italy. 90-100.
- Monin G., 2003. Abattage des porcs et qualités des carcasses et des viandes. *INRA Prod. Anim.*, 16, 251-262.
- Morzal M., Sohler D., De Vis H., 2003. Evaluation of slaughtering methods for turbot with respect to animal welfare and flesh quality. *J. Sci. Food Agric.*, 83, 19-28.
- Morzal M. C.C., Lefèvre F., Paboeuf G. and Laville E., 2006. Modifications of Trout (*Oncorhynchus mykiss*) muscle proteins by preslaughter activity. *J. Agric. Food Chem.*, 54, 2997-3001.
- Ngoka D.A., Froning G.W., 1982. Effect of Free Struggle and Pre-Slaughter Excitement on Color of Turkey Breast Muscles. *Poult. Sci.*, 61, 2291-2293.
- Nijdam E., Arens P., Lambooij E., Decuyper E., Stegeman J., 2004. Factors influencing bruises and mortality of broilers during catching, transport, and lairage. *Poult. Sci.*, 83, 1610-1615.
- O'Connell N.E., Beattie V.E., Moss B.W., 2004. Influence of social status on the welfare of growing pigs housed in barren and enriched environments. *Anim. Welf.*, 13, 425-431.
- Olsson I.A.S., De Jonge F.H., Schuurman T. Helmond F.A., 1999. Poor rearing conditions and social stress in pigs: repeated social challenge and the effect on behavioural and physiological responses to stressors. *Behav. Proc.*, 46, 201-215.
- Papinaho P.A., Fletcher D.L., Buhr R.J., 1995. Effect of Electrical Stunning Amperage and Peri-Mortem Struggle on Broiler Breast Rigor Development and Meat Quality. *Poult. Sci.*, 74, 1533-1539.
- Ruiz-de-la-Torre J.L., Velarde A., Diestre A., Gispert M., Hall S.J.G., Broom D.M., Manteca X., 2001. Effects of vehicle movements during transport on the stress responses and meat quality of sheep. *Vet. Rec.*, 148, 227-229.
- Schneider B.L., Renema R.A., Betti M., Carney V.L., Zuidhof M.J., 2012. Effect of holding temperature, shackling, sex, and age on broiler breast meat quality. *Poult. Sci.*, 91, 468-477.
- Skjervold P.O., Fjaera S.O., Ostby P.B., Einen O., 2001. Live-chilling and crowding stress before slaughter of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 192, 265-280.
- Sneddon L.U., 2009. Pain Perception in Fish: Indicators and Endpoints. *Ilar J.*, 50, 338-342.
- Tallet C., Brilloüet A., Paulmier V., Meunier-Salaun M.C., Prunier A., 2011. Conséquences de l'élevage de porcs mâles entiers sur la relation homme-animal en environnement conventionnel et enrichi. *Journ. Rech. Porcine*, 43, 155-159.
- Terlouw C., 2005. Stress reactions at slaughter and meat quality in pigs: genetic background and prior experience: A brief review of recent findings: Product quality and livestock systems. *Livest. Prod. Sci.*, 94, 125-135.
- Terlouw E.M.C., Porcher, J., 2005. Repeated handling of pigs during rearing. I. Refusal of contact by the handler and reactivity to familiar and unfamiliar humans. *J. Anim. Sci.*, 83, 1653-1663.
- Terlouw E.M.C., Rybarczyk P., 2008. Explaining and predicting differences in meat quality through stress reactions at slaughter: The case of large white and duroc pigs. *Meat Sci.*, 79, 795-805.
- Terlouw C., Ludriks A., Schouten W., Vaessen S., Fernandez X., Andanson S., M.C. Perez., 2001. Prédominance de l'allèle de sensibilité à l'halothane. *Viandes Prod. Carnés*, 22.
- Terlouw E.M.C., Porcher J., Fernandez X., 2005. Repeated handling of pigs during rearing. II. Effect of reactivity to humans on aggression during mixing and on meat quality. *J. Anim. Sci.*, 83, 1664-1672.
- Terlouw E.M.C., Arnould C., Auperin B., Berri C., Le Bihan-Duval E., Deiss V., Lefèvre F., Lensink B.J., Mounier L., 2008. Pre-slaughter conditions, animal stress and welfare: current status and possible future research. *Animal*, 2, 1501-1517.
- Terlouw C., Berne A., Astruc T., 2009. Effect of rearing and slaughter conditions on behaviour, physiology and meat quality of Large White and Duroc-sired pigs. *Livest. Sci.*, 122, 199-213.
- Terlouw E.M.C., Bourguet C., Deiss V., 2012. Stress at slaughter in cattle: role of reactivity profile and environmental factors. *Anim. Welf.*, 21, 43-49.
- Thomas P.M., Pankhurst N.W., Bremner H.A., 1999. The effect of stress and exercise on post-mortem biochemistry of Atlantic salmon and rainbow trout. *J. Fish Biol.*, 54, 1177-1196.
- van de Vis H., Kestin S., Robb D., Oehlenschläger J., Lambooij B., Munkner W., Kuhlmann H., Kloosterboer K., Tejada M., Huidobro A., Ottera H., Roth B., Sorensen N.K., Akse L., Byrne H., Nesvadba P., 2003. Is humane slaughter of fish possible for industry? *Aquacult. Res.*, 34, 211-220.
- Veiseth-Kent E., Grove H., Faergestad E.M., Fjaera S.O., 2010. Changes in muscle and blood plasma proteomes of Atlantic salmon (*Salmo salar*) induced by crowding. *Aquaculture*, 309, 272-279.
- Warner R.D., Ferguson D.M., Cottrell J.J., Knee B.W., 2007. Acute stress induced by the preslaughter use of electric prodders causes tougher beef meat. *Aust. J. Exp. Agr.*, 47, 782-788.
- Warriss P.D., Kestin S.C., Brown S.N., Bevis E.A., 1988. Depletion of Glycogen Reserves in Fasting Broiler-Chickens. *Br. Poult. Sci.*, 29, 149-154.
- Warriss P.D., Kestin S.C., Brown S.N., Knowles T.G., Wilkins L.J., Edwards J.E., Austin S.D., Nicol C.J., 1993. The depletion of glycogen stores and indices of dehydration in transported broilers. *Br. Vet. J.*, 149, 391-398.
- Zhong R.Z., Liu H.W., Zhou D.W., Sun H.X., Zhao C.S., 2011. The effects of road transportation on physiological responses and meat quality in sheep differing in age. *J. Anim. Sci.*, 89, 3742-3751.

Résumé

On sait depuis longtemps que lorsque les animaux sont stressés pendant la période de l'abattage, le risque de produire des viandes avec des défauts de qualité, notamment les viandes exsudatives et à coupe sombre, augmente. Des études récentes basées sur des approches comportementales, physiologiques et/ou génomiques montrent que des niveaux de stress modérés au cours de l'abattage peuvent également influencer les qualités technologiques et/ou sensorielles des viandes de porc, de bovin, d'ovin, de volaille et des chairs de poisson, expliquant jusqu'à 70% de la variabilité des composantes de qualité entre les animaux. La réactivité au stress d'abattage varie selon les individus et peut être partiellement prédite à partir de leurs réactions lors de tests de réactivité réalisés pendant l'élevage. La réactivité au stress d'un animal dépend en partie de ses expériences antérieures et de son patrimoine génétique. En plus des questions relatives au bien-être animal à l'abattage, il est nécessaire aujourd'hui de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents aux effets négatifs du stress sur les qualités des viandes. L'espèce doit être prise en considération, car les causes de stress à l'abattage et les critères de qualité de viandes optimaux varient selon l'espèce. Les mécanismes biologiques impliqués dans les effets du stress sur la viande et la chair varient également en fonction de l'espèce.

Abstract

Stress during rearing and at slaughter: influence on meat quality

It has long been known that stress during the slaughter period may result in the production of meat with major quality defects, particularly exudative and dark-cutting meat. Recent studies using behavioural, physiological and/or genomic approaches found that less extreme stress levels during slaughter may also influence technological and/or sensory qualities of meat from pigs, cattle, sheep, poultry and fish flesh, sometimes explaining over 70% of inter-animal variability in quality. Stress reactivity at slaughter varies between individuals and may be predicted from their reactions to stressful challenges during the rearing period. The stress reactivity of an animal depends partly on its earlier experiences and genetic background. In addition to slaughter-related animal welfare questions, today's challenge is to increase our understanding of the physiological and molecular mechanisms underlying the effects of stress on meat quality. The different species should be taken into account, as the causes of stress at slaughter and criteria for optimal meat quality are species-specific. In addition, the biological mechanisms underlying the effect of stress on meat and flesh quality partly differ between species.

TERLOUW E.M.C., CASSAR-MALEK I., PICARD B., BOURGUET C., DEISS V., ARNOULD C., BERRI C., LE BIHAN-DUVAL E., LEFÈVRE F., LEBRET B., 2015. Stress en élevage et à l'abattage : impacts sur les qualités des viandes. In : Numéro spécial. Le muscle et la viande. Picard B., Lebreton B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, 169-182.