



# Prédire la qualité des viandes : mythe ou réalité ?

**Etat des lieux des avancées récentes réalisées dans le domaine de la prédiction des qualités des viandes ; réflexion sur les perspectives d'application**

**Mots-clés :** Viande, Qualité, Prédiction, Marqueur biologique, Spectroscopie, Modèle phénotypique

**Auteurs :** Cécile Berri<sup>1</sup>, Brigitte Picard<sup>2</sup>, Bénédicte Lebre<sup>3</sup>, Donato Andueza<sup>2</sup>, Antoine Vautier<sup>4</sup>, Pascal Chartrin<sup>1</sup>, Stéphane Beauclercq<sup>1</sup>, Florence Lefèvre<sup>5</sup>, Isabelle Legrand<sup>6</sup>, Jean-François Hocquette<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INRA, URA, 37380 Nouzilly, France ; <sup>2</sup> INRA, VetAgro Sup, UMRH, Theix 63122 Saint-Genès Champanelle, France ; <sup>3</sup> INRA, AgroCampus Ouest, UMR PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France ; <sup>4</sup> IFIP - Institut du porc, La motte au Vicomte, 35651 Le Rheu cedex, France ; <sup>5</sup> INRA, UR 1037 LPGP, 35042 Rennes, France ; <sup>6</sup> Institut de l'Élevage, Service Qualité des viandes, 87000 Limoges, France

\* E-mail de l'auteur correspondant : [cecile.berri@inra.fr](mailto:cecile.berri@inra.fr)

**La prédiction de la qualité de la viande bénéficie des récents développements technologiques en génomique, en protéomique, en métabolomique et dans le domaine de la Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) ainsi que de la conception de modèles combinant les facteurs déterminant la qualité de l'amont à l'aval.**

## Résumé :

Cette revue a pour objectif de faire un point sur les avancées récentes obtenues dans le domaine de la prédiction de la qualité des viandes. Elle aborde différentes démarches menées au sein des principales filières de production pour développer des équations puis des outils prédictifs basés sur différents types de marqueurs biologiques (génomiques ou phénotypiques) ou physiques (spectroscopiques). Au travers des différents exemples présentés, il apparaît que l'identification de marqueurs biologiques se confronte au déterminisme complexe des paramètres de qualité qui rend encore difficile la mise au point de tests moléculaires génériques utilisables sur le terrain. Toutefois, les avancées ont été notables ces dernières années bénéficiant des récents développements technologiques en génomique, protéomique et métabolomique. Les premières équations de prédiction de la qualité sensorielle et du potentiel technologique des viandes laissent entrevoir des possibilités d'applications dans les années à venir. Concernant la spectroscopie, les principaux résultats ont été obtenus dans le domaine de la Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) avec des développements aboutis pour prédire la composition et la valeur nutritionnelle des viandes. La prédiction du potentiel technologique des viandes à l'aide de cette méthode et surtout de la qualité sensorielle est en revanche plus difficile. Enfin, l'exemple du modèle phénotypique MSA (« Meat Standards Australia ») de prévision de la qualité sensorielle de la viande bovine basée sur une combinaison de données d'amont et d'aval et dont la plus-value pour la filière a été démontrée en Australie, présente une généricité qui a déjà été éprouvée dans plusieurs pays.

## Abstract: Predicting quality of meats: myth or reality?

This review was aimed at providing an overview of recent advancements obtained in the field of meat quality prediction. The different methods used in the production sectors for the development of equations and the tools used based on different types of biological markers (genomic or phenotypic) or physical (spectroscopy) are discussed. Through the different examples that are presented, it appears that the identification of biological markers is confronted with the complex determinism of quality parameters. This makes the development of generic molecular tests to be used on the field even more difficult. However, in recent years, progress has been made, benefitting from genomics, proteomics and metabolomics technological developments. The first equations that predict the sensorial quality and the technological potential of meat hint to possible applications in the near future. Concerning spectroscopy, the main results were obtained using Near Infrared Spectroscopy (NIR) with developments obtained for the prediction of the composition and nutritional value of meats. The prediction of the technological potential of meats using this method and mainly the sensorial quality is, however, more difficult. Finally, the example of the MSA (« Meat Standards Australia ») phenotypic model which predicts the sensorial quality of bovine meat based on a combination of upstream and downstream data and whose added-value for the sector has been identified in Australia, presents a genericity that has already been proven in several countries.

## INTRODUCTION

La maîtrise de la qualité de la viande, notamment sensorielle, reste un enjeu important pour l'ensemble des filières. C'est particulièrement le cas pour la production de viande de ruminants notamment de viande bovine, mais aussi pour les filières de production de viandes blanches, volailles et porcs, même si pour ces dernières, la maîtrise de la qualité technologique (aptitude à la transformation) est tout aussi importante (Lebret et Picard, 2015). Les efforts réalisés depuis de nombreuses années en termes de recherche et de développement ont permis de mieux comprendre l'impact des différents facteurs de production sur les caractéristiques musculaires et la qualité de la viande qui en résulte mais aussi de démontrer un déterminisme complexe des caractéristiques biologiques du muscle, le plus souvent sous l'influence de nombreux facteurs liés à la génétique ou au mode de production et d'abattage des animaux (Lebret et al., 2015). Dans ces conditions, disposer d'indicateurs fiables pour

prédire la qualité des viandes est un enjeu majeur. Ces indicateurs faciliteraient la sélection d'animaux aptes à produire des viandes de bonnes qualités. De plus, ils permettraient l'amélioration des pratiques d'élevage et d'abattage susceptibles d'optimiser les capacités intrinsèques des tissus musculaires favorables à la qualité des viandes. De nombreux travaux ont été engagés dans cette optique avec la mise en œuvre de méthodologies diverses dans les domaines de la biologie, de la physicochimie et de la modélisation. Cette revue a pour objectif de présenter, au travers d'exemples, les différentes approches développées au sein des principales filières de production (à l'exception des tests génétiques) afin de mieux prédire la qualité sensorielle et technologique des viandes et produits carnés. Cette revue se propose également d'avoir une analyse critique vis-à-vis des résultats obtenus ou des freins identifiés au développement sur le terrain de ces nouvelles méthodologies.

## I. A LA RECHERCHE DES GENES QUI CONTROLENT LA QUALITE DES VIANDES

Le porc et la volaille constituent les deux principales viandes consommées dans le monde, sous forme d'une grande diversité de produits, frais ou transformés. La notion de qualité de viande dans ces espèces est donc complexe, et les composantes technologiques et sensorielles qui ont des déterminants souvent communs sont généralement considérées simultanément pour évaluer la qualité des produits dans la filière (Berri, 2015 ; Lebret et Faure, 2015). Comme pour toutes les espèces, la qualité des viandes de volailles et de porc résulte d'interactions entre facteurs génétiques, d'élevage, d'abattage et de transformation des produits. Si de nombreux facteurs génétiques ou d'élevage influençant la qualité ont été identifiés, celle-ci reste variable et difficile à prédire. La recherche de biomarqueurs *ante- ou post-mortem* de qualité a donc été entreprise dans ces espèces en vue de prédire *in vivo* ou rapidement après abattage la qualité technologique ou sensorielle des viandes ou carcasses afin d'optimiser leur utilisation dans différentes filières de transformation. Les applications potentielles sont multiples : sélection d'animaux reproducteurs pour la sélection mais aussi, dans le cas du porc, tri des carcasses ou des pièces à l'abattoir (revue de Picard et al., 2015).

Chez le porc, la recherche de biomarqueurs de qualité a été réalisée par des approches transcriptomiques sur la longe et le jambon. Les premiers travaux ont porté sur quelques caractères d'intérêt dans des dispositifs expérimentaux différentiels (lots contrastés sur la teneur en lipides intramusculaires (LIM), le défaut de déstructuration, la dureté de la viande cuite...). Ainsi, Damon et al. (2006) ont identifié des marqueurs moléculaires de la déstructuration du jambon, dont la tropomoduline 4, impliquée dans la dégénérescence de cardiomyocytes chez la souris et des enzymes de la cascade du métabolisme glycolytique. Sur la longe, l'exploitation de données transcriptomiques a permis de proposer 12 gènes prédictifs de la dureté de la viande cuite (Lobjois et al., 2006). Concernant les LIM, caractère associé à la tendreté et à la jutosité de la viande de porc, Liu et al. (2009) et Hamill et al. (2012) ont montré que leur teneur est associée à l'expression de gènes de différentes catégories fonctionnelles, mais aussi de gènes impliqués dans la régulation de l'adipogenèse pendant la croissance de l'animal, rendant difficile l'identification de prédictifs moléculaires « robustes » de ce caractère mesurable au stade d'abattage.

Un dispositif expérimental induisant une variabilité progressive et élevée des qualités technologique et sensorielle de la viande de porc (2 races produites dans différents systèmes d'élevage, n=100 ; Lebret et al., 2015) a été mis à profit pour identifier puis valider des biomarqueurs de qualité. De très nombreuses associations (biomarqueurs potentiels) ont été identifiées entre transcrits (puces à ADN) et caractères de qualité de la longe (entre une centaine pour la couleur (a\*) à près de 3000 pour la tendreté), confirmées par qRT-PCR (méthode plus rapide et moins onéreuse pour quantifier l'expression génique, donc mieux adaptée au développement ultérieur d'outils) puis testées sur d'autres animaux du même dispositif ; 60 corrélations significatives (P<0,05) impliquant 26 gènes et 8 caractères : pHu (pH ultime), pertes en eau, couleur : L\* (luminance), a\* (indice de rouge), h° (angle de teinte), LIM, force de cisaillement, tendreté, avec un coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) maximum de 0,46 entre la variabilité d'un caractère et l'expression d'un gène, ont ainsi été validées (Damon et al., 2013). Une validation externe réalisée sur 100 porcs commerciaux (Duroc × Landrace × Yorkshire) a permis de valider 19 de ces biomarqueurs (R<sup>2</sup> ≤ 0,24, P<0,05) : pHu (6), pertes en eau (4), L\* (5), h° (2), teneur en LIM (1) et tendreté (1) (Lebret et al., 2013). Des modèles de régression multiple incluant entre 3 et 5 gènes et expliquant jusqu'à 59% (pour h°) de la variabilité des caractères ont également été établis sur ces données expérimentales, mais leur valeur prédictive testée sur les porcs commerciaux s'avère modérée (r ≤ 0,48, P ≤ 0,01 entre valeurs prédites et mesurées). D'autre part, à partir des données transcriptomiques, des modèles prédictifs ont été établis (statistiques linéaires : régression, sparse PLS et non paramétriques : forêts aléatoires). Si l'identification de marqueurs de caractères spécifiques est à même de se poursuivre, les études actuelles s'orientent plutôt vers la recherche de marqueurs discriminant des classes de qualité qui agrègent la mesure de plusieurs indicateurs.

Ainsi, dans le but d'améliorer la capacité des biomarqueurs à prédire un niveau de qualité, une autre stratégie a été développée qui vise à établir des classes de qualité de viande combinant les dimensions technologique et sensorielle, puis à rechercher des biomarqueurs de ces classes de qualité (Lebret et al., 2016). A partir des données de caractères technologiques et sensoriels de la longe issues du

dispositif expérimental ci-dessus (n=100) et en combinant des approches d'expertise scientifique et de statistiques, des classes de qualité (à défaut/correct/extra) ont été établies. Les données d'expression de 40 gènes déterminées sur ces échantillons ont été exploitées pour proposer un modèle linéaire multinomial généralisé permettant de prédire l'appartenance d'un échantillon à une classe de qualité. Le meilleur modèle prédictif inclut 12 gènes qui correspondent à différentes fonctions biologiques associés à l'élaboration de la qualité de la viande : métabolismes énergétique, lipidique et glucidique, contrôle de l'expression génique, processus de régulation cellulaire et d'apoptose, transport des protéines et du calcium, structure, contraction et hypertrophie musculaires. Ce modèle présente après validation croisée sur l'ensemble de l'échantillon en utilisant la méthode du leave-one-out un taux moyen de bon classement de 76% (88% pour les échantillons à défaut et 82% pour les échantillons extra ; Leuret et al., 2016). Ces résultats prometteurs permettent d'envisager le développement d'outils pour discriminer rapidement après abattage les pièces de viande sur leur niveau de qualité, afin d'optimiser leur valorisation.

**Chez le poulet**, la recherche de transcrits musculaires prédictifs de la qualité du filet a été entreprise sur plusieurs types de dispositifs : des groupes d'animaux extrêmes en termes de caractéristiques musculaires (viandes acides ou DFD pour « Dark, Firm, Dry ») issus de lignées divergentes pour l'engraissement ou le pH ultime du filet, ou des croisements entre lignées permettant d'avoir accès à des individus se différenciant spécifiquement pour le caractère de qualité étudié mais présentant un fond génétique plus homogène pour d'autres caractères, notamment de production. Les principaux caractères étudiés étaient liés à la chute de pH post-mortem (p.m.), notamment le pH mesuré 15 min. p.m (pH15) et le pH mesuré 24h p.m. (pHu) du filet, qui en influençant les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des protéines vont impacter un grand nombre de paramètres de qualité, à savoir la couleur, le pouvoir de rétention d'eau, la dureté après cuisson, le rendement technologique et la susceptibilité à l'oxydation (Le Bihan-Duval et al., 2008 ; Alnahhas et al., 2014, 2015).

Le premier réseau de gènes liés au pH ultime du filet a été obtenu en étudiant les lignées maigre ou grasse de poulet et a mis en évidence l'intervention de plusieurs voies importantes pour le contrôle du glycogène dans le muscle comme la voie AMP dépendante impliquant le complexe AMPK (AMP-activated protein kinase) déjà suggérée par Sibut et al. (2008) mais aussi des voies de signalisation dépendantes de l'AMP cyclique ou encore impliquées dans le contrôle de la disponibilité des glucides dans le muscle (Sibut et al., 2011). Pour s'affranchir des liens démontrés chez le poulet entre engraissement périphérique et capacités de stockage du glycogène musculaire (Sibut et al., 2008), un dispositif de lignées divergeant spécifiquement sur le pH ultime (pHu) du filet a été créé (Alnahhas et al., 2014). L'analyse du transcriptome musculaire des animaux issus de ces deux lignées (pHu+ et pHu-) a révélé des statuts métaboliques et des modes de production d'énergie très différents entre lignées, les muscles des animaux pHu- utilisant principalement leur forte réserve en glucides et ceux des pHu+ des voies cataboliques alternatives entraînant un remodelage important du tissu musculaire (Beauclercq et al., 2015). A partir du transcriptome, incluant 1436 gènes identifiés comme différentiels entre individus pHu+ et pHu-

des modèles sPLS (sparse Partial Least Squares) ont été ajustés pour prédire le pHu. Les modèles développés présentent un bon pouvoir explicatif et prédictif du pHu ( $R^2Y = 0,77 - 0,87$ ,  $Q^2 = 0,68 - 0,79$ ). Vingt et un gènes provenant de ces modèles complétés par 27 autres gènes candidats biomarqueurs du pHu ont été sélectionnés pour validation par qRT-PCR à haut débit (technologie Fluidigm) sur une population de 280 animaux issus des deux lignées (gamme de pHu 5,41 – 6,50). A l'issue de cette analyse et d'une étape d'élimination des gènes avec un faible pouvoir explicatif, un modèle PLS final incluant 20 gènes a pu être ajusté, permettant de prédire le pHu du filet avec un pouvoir explicatif ( $R^2$ ) de 0,65, un pouvoir prédictif ( $Q^2$ ) de 0,62 et un taux d'erreur de 16%. Parmi les gènes biomarqueurs retenus dans le modèle PLS final, on retrouve entre autres ANKRD1, impliqué dans le métabolisme des lipides, l'organisation des sarcomères et les flux de calcium dans le muscle, qui a également été identifié comme biomarqueur du pHu chez le porc (Damon et al., 2013).

Récemment, des études réalisées sur des dispositifs avec des informations pedigree ont permis de combiner des données positionnelles (QTL) et expressionnelles (transcrits) avec pour objectif d'identifier des marqueurs génétiques ou des mutations responsables de la variation des caractères de qualité de viande, et de faciliter la mise en œuvre d'outils d'aide à la sélection. Ainsi, la détection d'un QTL d'expression (ou eQTL) a confirmé que le gène BCMO1 (qui code la  $\beta$ -carotène 15,15'-mono-oxygénase 1) était responsable de la variation de coloration jaune de la viande de poulet, et a accéléré l'identification de mutations causales au sein de sa région promotrice (Le Bihan-Duval et al., 2011). Ces résultats ont conduit au développement d'un test génétique breveté (Le Bihan-Duval et al., 2010) et actuellement disponible pour les sélectionneurs qui souhaitent maîtriser la coloration jaune du filet de poulet, notamment en réponse aux variations de composition des rations alimentaires. En effet, des études d'interactions avec l'alimentation ont démontré la possibilité de moduler le dépôt des pigments xanthophylles et donc la coloration des viandes grâce à ce test (Jlali et al., 2012, 2014).

**Chez la truite**, une stratégie de développement et de validation de biomarqueurs de fermeté est en cours. Parmi les gènes différentiellement exprimés entre des filets "mous" et "fermes", a été fait le choix d'explorer des gènes codant pour des composés de la matrice extracellulaire. Six gènes validés (Cilp, Col5a1, Col1a3, Postn, Tnc, et Itgb1) ont été quantifiés dans 3 expérimentations conduisant à des différences de fermeté des filets. Le niveau d'expression de 4 de ces gènes (Cilp, ColVa1, Colla3, Postn) s'est révélé corrélé à une différence de fermeté dans au moins une de ces expérimentations. Par contre, des différences de fermeté mesurées dans certains modèles comme les lignées grasse et maigre ne sont pas liées au niveau d'expression de ces marqueurs ce qui souligne le déterminisme complexe d'une qualité comme la texture dans cette espèce.

Chez le bovin, une démarche similaire de transcriptomique a été appliquée à la recherche de transcrits reliés à la tendreté de la viande (revue de Cassar-Malek et Picard, 2015). Cette approche associée à l'analyse protéomique développée ci-dessous a permis d'établir une liste de biomarqueurs de tendreté.

## II. QUANTIFICATION DE PROTEINES POUR PREDIRE LA TENDRETE DE LA VIANDE BOVINE

L'objectif des recherches sur la viande bovine est depuis longtemps la maîtrise et la prédiction de la tendreté (Gruffat et al., 2015). Bien que de nombreux travaux aient précisé le rôle des composants musculaires (tissu conjonctif, fibres, lipides, protéases ; Guillemain et al., 2009a ; Listrat et al., 2015) et que les effets du type de muscle, ou d'animal, et des conduites d'élevage ou de maturation soient bien documentés (Oury et al., 2007 ; Lebret et al., 2015), cette qualité pose toujours des problèmes à la filière. Les techniques disponibles pour évaluer la tendreté (mesures mécaniques, jury d'analyse sensorielle, tests consommateurs) ne peuvent être appliquées qu'après la maturation et éventuellement la cuisson de la viande, et sont lourdes à mettre en œuvre et coûteuses. Par conséquent, l'évaluation de la tendreté à l'abattage se fait essentiellement à dire d'expert. La filière est demandeuse de critères objectifs et d'outils d'évaluation et de prédiction de cette qualité afin de pouvoir la gérer et limiter sa variabilité.

Une stratégie mise en œuvre depuis une dizaine d'années a consisté à identifier des protéines biomarqueurs de la tendreté avec l'objectif de proposer à terme un test de quantification à usage des opérateurs de la filière (revues de Picard et al., 2012, 2015 ; Cassar-Malek et Picard, 2016). L'analyse des protéines permet un plus par rapport à l'analyse des gènes ou des transcrits, car l'expression d'un gène ne signifie pas systématiquement que la protéine correspondante est présente dans un tissu considéré. Par ailleurs, une protéine peut exister sous plusieurs formes (isoformes) et peut subir des modifications post-traductionnelles qui sont observables grâce à des séparations par électrophorèse bidimensionnelle telles que celle mise au point par Bouley et al. (2004).

Comme dans le cas des études transcriptomiques, la démarche suivie pour identifier des protéines biomarqueurs de tendreté s'est inspirée des approches développées dans le milieu médical pour révéler des protéines biomarqueurs de certaines pathologies. Elle a consisté à comparer des échantillons extrêmes de tendreté (mesurée par mesures mécaniques et/ou analyse sensorielle), afin de révéler des protéines dont l'abondance variait selon ce caractère (Bouley et al., 2004 ; Morzel et al., 2008). Cette première étape appliquée dans plusieurs expérimentations a permis de proposer une liste de biomarqueurs candidats complétée ensuite avec des protéines connues pour avoir des interactions fonctionnelles avec les biomarqueurs candidats et révélées par analyses bio-informatiques (Guillemain et al., 2011). Les relations entre la tendreté et les teneurs en biomarqueurs ont ensuite été testées sur un grand nombre de bovins de divers types (âge, sexe, race) grâce à une technique immunologique développée spécifiquement (Guillemain et al., 2009b). Les biomarqueurs validés ont été utilisés dans des équations de prédiction (Picard et al., 2014). Sur la vingtaine de protéines mesurées, 4 à 5 sont impliquées dans les équations de prédiction dont le niveau de détermination et l'erreur varient selon le muscle et le type d'animal considérés : par exemple, la prédiction de la force de cisaillement du rond de gîte est supérieure à celle calculée pour l'entrecôte, elle-même supérieure à la prédiction de la note de tendreté (déterminée par un jury entraîné) de ce morceau (Picard et al., 2014). Pour certains biomarqueurs, la relation entre leur abondance et la tendreté est spécifique d'un muscle ou d'un type d'animal. Par exemple, des protéines associées au type contractile rapide glycolytique sont reliées positivement à la tendreté du rond de gîte, et négativement à la tendreté de l'entrecôte (Picard et al., 2015). Pour d'autres protéines biomarqueurs,

ce n'est pas le cas. Ainsi, la Hsp70-1B est négativement reliée à la tendreté du rond de gîte comme de l'entrecôte chez des taurillons de races pures françaises ou de race Aberdeen Angus qui présente un métabolisme musculaire plus oxydatif que les races françaises (Picard et al., 2015). Enfin, des protéines de structure comme l'alpha-actine, la CapZ-beta ou la desmine, ont été identifiées comme biomarqueurs positifs de la tendreté dans différentes races et muscles par plusieurs auteurs (Morzel et al., 2008 ; Chaze et al., 2013 ; Laville et al., 2007). L'ensemble de ces travaux a permis des avancées considérables dans la connaissance des processus biologiques impliqués dans la tendreté (Ouali et al., 2013 ; D'Alessandro et Zola, 2015). L'étape ultime en cours, est de développer dans les deux ans un outil terrain permettant de mesurer l'abondance des protéines associées à la tendreté pour contribuer à prédire ce caractère à l'aide d'équations de prédiction pour différentes conditions de maturation et de cuisson. Ce type d'outil pourrait être utilisé à l'abattoir afin de gérer objectivement la commercialisation des morceaux en fonction de leur tendreté. Utilisé sur animal vivant pour évaluer son « potentiel tendreté », il pourrait également fournir des données phénotypiques utiles pour la sélection génomique ou le pilotage fin de sa conduite d'élevage.

Cette démarche appliquée à la tendreté est applicable à d'autres critères de qualité. Ainsi, des protéines biomarqueurs de la teneur en lipides des viandes ont été identifiées (Bonnet et Picard, communication personnelle). Certaines protéines biomarqueurs de tendreté apparaissent être aussi de bon biomarqueurs d'autres qualités comme le pH, la couleur, la jutosité ou la flaveur (Gagaoua et al., 2015 ; Picard et al., 2011). En particulier l'abondance de la protéine PRDX6 (peroxyredoxine) identifiée comme biomarqueur de tendreté par plusieurs auteurs (Jia et al., 2009 ; Picard et al., 2014) se révèle être négativement reliée au pH45 minutes, 3 heures *post-mortem* et au pH ultime dans l'entrecôte de taurillons Blonde d'Aquitaine (Gagaoua et al., 2015). Elle est aussi positivement reliée au paramètre  $a^*$  de la couleur (indice de rouge) dans ce même muscle. Ces auteurs ont également montré que la protéine Hsp70-1B et la protéase calcium dépendante  $\mu$ -calpaïne, étaient reliées aux 3 paramètres de couleur  $L^*a^*b^*$  (Luminance, indice de rouge et de jaune).

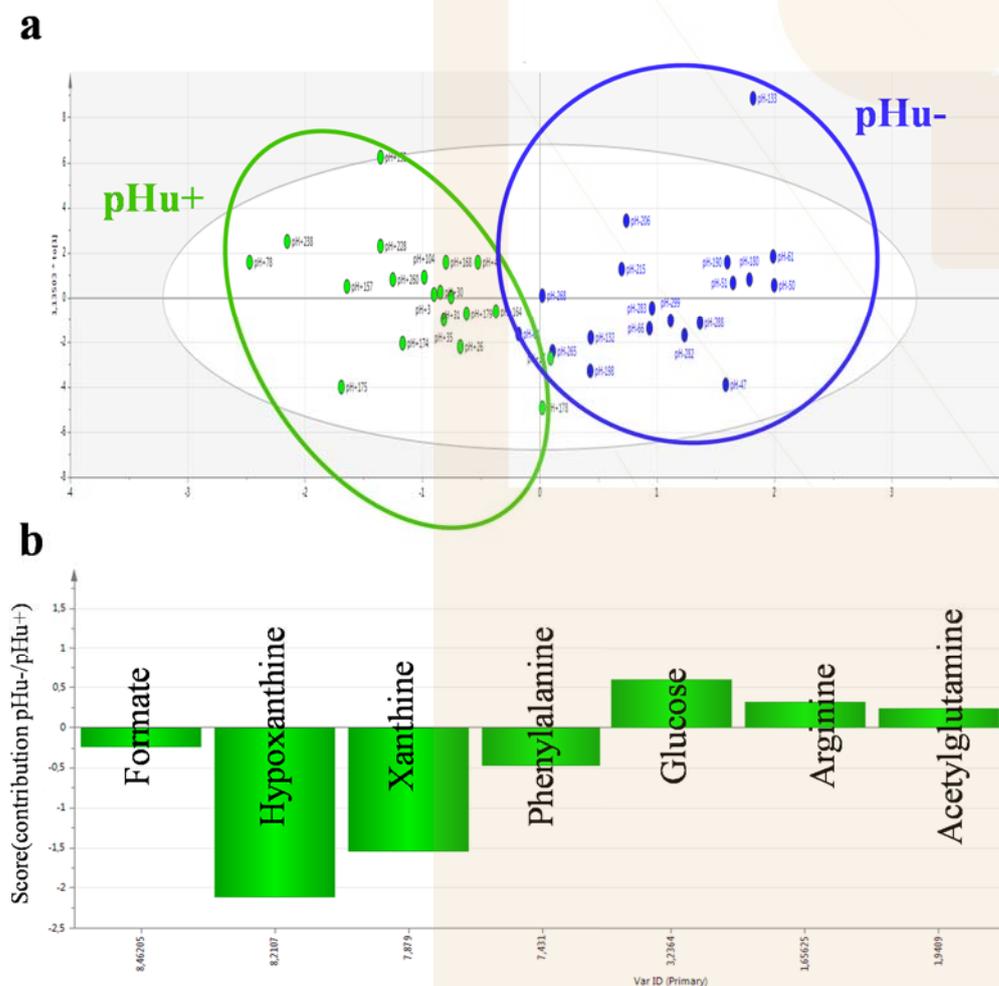
Ces données permettent d'envisager à moyen terme la prédiction de l'ensemble des qualités sensorielles à partir de la mesure d'abondances de biomarqueurs. Les précisions sont variables selon les muscles et types d'animaux mais au moins de 70% pour la prédiction de la tendreté ou de l'adiposité. Certaines de ces protéines sont aussi associées à l'hypertrophie musculaire, laissant envisager le pilotage conjoint de la quantité de viande et de sa qualité sensorielle. Le lien entre qualité sensorielle et nutritionnelle, en particulier via des protéines impliquées dans le stress oxydant, est en cours d'étude afin de pouvoir aussi appliquer à terme cette stratégie à la prédiction de la valeur santé de la viande (Gagaoua et al., 2014 ; Gatellier et al., 2014). Pour être applicable en routine, l'outil terrain doit être facile d'utilisation, permettre l'obtention d'un résultat rapide et avoir un coût limité pour être économiquement intéressant. Les méthodes développées jusqu'à présent ne répondent pas encore à tous ces critères, mais les travaux en cours laissent espérer l'obtention d'un tel outil d'ici 2-3 ans. Les techniques de quantification des protéines ne cessant d'évoluer, les progrès récents ont permis de considérables simplifications méthodologiques.

### III. BIOMARQUEURS SANGUINS : PREMIERS RESULTATS ENCOURAGEANTS

Disposer de marqueurs sanguins de la qualité faciliterait grandement le développement des méthodes de phénotypage sur animal vivant. Le modèle des lignées pHu+ et pHu- développé chez le poulet (cf. §2) a été utilisé pour identifier des métabolites sanguins et musculaires prédictifs du pHu des filets de poulet. A cette fin, des extraits de muscle (filet) et de sérum issus d'animaux extrêmes appartenant aux deux lignées ont été analysés par RMN haute résolution (du proton et du phosphore pour le muscle et du proton pour le sérum). Ces analyses ont révélé des signatures métabolomiques très spécifiques des deux groupes, à la fois dans le sang et le muscle, permettant une discrimination quasi parfaite de ceux-ci (Beauclercq *et al.*, 2016). Au total, 20 et 26 métabolites discriminant les deux lignées ont été identifiés par analyse multivariée OPLS-DA dans le sérum et le muscle, respectivement. Trois modèles indépendants ont été ajustés présentant un bon pouvoir explicatif ( $R^2Y$ ) et prédictif ( $Q^2$ ) du pHu ( $R^2Y = 0,63 - 0,82$ ,  $Q^2 = 0,45 - 0,76$ ). Un modèle multiblock, incluant des métabolites musculaires et sanguins a par la suite été développé présentant encore de meilleurs

pouvoirs explicatif ( $R^2Y = 0,91$ ) et prédictif ( $Q^2 = 0,86$ ) du pHu. Toutefois, dans l'optique de développer un test utilisable en routine sur animaux vivants, l'étude s'est intéressée spécifiquement aux métabolites identifiés dans le sang. Ainsi, un modèle incluant 7 métabolites (acetylglutamine, arginine, formate, glucose, hypoxanthine, phénylalanine et xanthine) permet une bonne discrimination ( $R^2Y = 0,73$ ,  $Q^2 = 0,64$ , Figure 1) et dans le même temps de limiter le plus possible les tests biologiques pour le diagnostic. Cependant, le potentiel prédictif de ce set de biomarqueurs sériques doit être validé sur d'autres populations de poulets à la fois plus représentatives de la variabilité de pHu observée en abattoir et présentant des fonds génétiques différents de celui des lignées pHu+ et pHu-. Si cette étape de validation est concluante, ces biomarqueurs pourraient être utilisés en sélection pour exclure des stocks parentaux les individus prédisposés à produire des viandes DFD ou acides, ou encore en recherche pour évaluer des innovations liées aux pratiques d'élevage des animaux.

**Figure 1 :** (a) Plan des composantes principales basé sur un modèle OPLS-DA présentant un pouvoir explicatif  $R^2Y$  de 0,73 et prédictif  $Q^2$  de 0,64 (les individus pHu- et pHu+ sont représentés en vert et en bleu, respectivement) ; (b) Contribution des 7 métabolites identifiés par OPLS-DA (pHu-/pHu+)



Chez le bovin, la recherche de biomarqueurs plasmatiques des qualités sensorielles de la viande a été initiée par analyse protéomique (Cassar-Malek *et al.*, 2016). En complément les outils de bioinformatique ont permis d'identifier des protéines sécrétées qui pourraient constituer de bons candidats

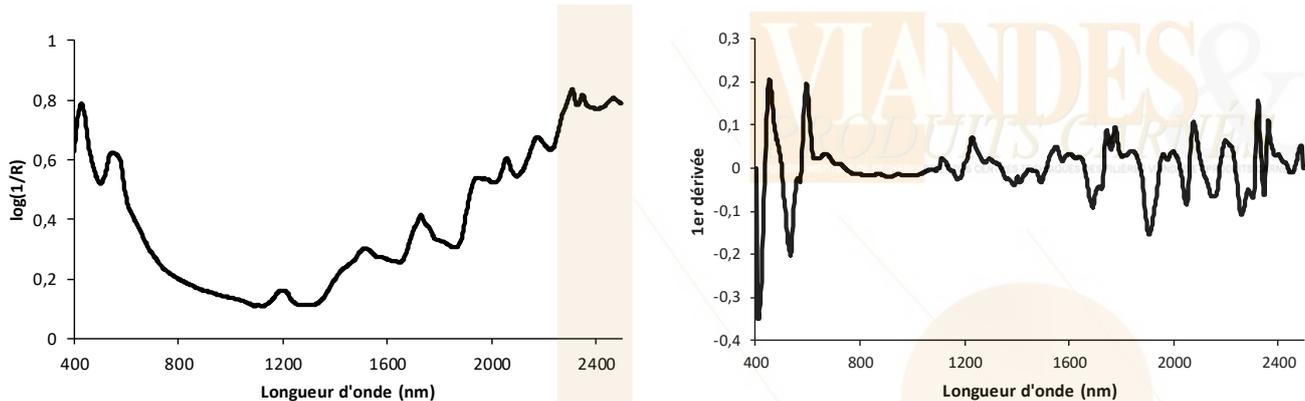
potentiels à quantifier dans le plasma (Bonnet *et al.*, 2016). Ces approches au niveau sanguin, représentent des pistes d'intérêt pour l'analyse de biomarqueurs de qualité de viande sur l'animal vivant.

## IV. METHODES SPECTROSCOPIQUES : LA PHYSICOCHIMIE AU SERVICE DE LA BIOLOGIE

La spectroscopie peut être définie comme l'étude de l'interaction de la lumière avec la matière. Parmi les types de spectroscopie qui sont actuellement appliqués à la prédiction de la qualité de la viande se trouvent la spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) et la spectroscopie Raman. Les principes de la SPIR sont très bien décrits dans la synthèse de Bertrand (2002) tandis que ceux de la spectroscopie Raman

peuvent être trouvés dans la synthèse de Yang et Ying (2011). Brièvement, ces technologies sont des méthodes physiques d'analyse basées sur la propriété d'absorption de la lumière à des fréquences spécifiques, par des molécules organiques. Des relations entre les valeurs de composition chimique et les valeurs d'absorbance ou leurs dérivées sont ensuite développées (Figure 2).

**Figure 2 : Spectre visible/proche infrarouge et première dérivée entre 400 et 2500 nm d'un échantillon du muscle bovin (*Rectus abdominis*) après broyage et lyophilisation**



### IV.1. Difficulté à prédire la qualité sensorielle

L'importance croissante des techniques spectroscopiques en général et de la SPIR en particulier, pour estimer la qualité sensorielle de la viande, est évidente au vu du nombre de travaux publiés ainsi que du nombre d'industriels qui se sont équipés d'appareils SPIR ces dernières années (Andueza et al., 2015, 2016).

Les caractéristiques sensorielles de la viande résultent de la teneur en différents composants chimiques, ou de paramètres technologiques (teneurs en lipides, collagène, typologie des fibres musculaires, pH, etc. ; Listrat et al., 2015). Les critères sensoriels pourraient donc être prédits par des méthodes spectroscopiques (Venel et al., 2001, Prieto, et al. 2009). Cependant, les résultats obtenus dans la bibliographie ne permettent pas la validation de cette hypothèse en raison de plusieurs problèmes. Selon Liu et al. (2003), lors d'une analyse sensorielle, l'utilisation d'une échelle de notation d'intensité des caractéristiques sensorielles trop étroite pourrait réduire la précision et l'exactitude de la prédiction. De plus, le fait que les échantillons scannés dans la plage du proche infrarouge ne soient pas forcément les mêmes morceaux de viande qui ont été testés par le jury de dégustation peut être également un autre facteur explicatif. La grande hétérogénéité de la viande sur un même muscle peut aussi entraîner des biais importants. Contrairement aux études citées ci-dessus, Ripoll et al. (2008) rapportent cependant des valeurs de  $R^2$  de 0,98 pour des modèles d'étalonnage réalisés pour la prédiction de la tendreté de la viande bovine. Cela pourrait s'expliquer par le fait que ces auteurs ont utilisé différentes races et différents niveaux de maturation, induisant une grande variabilité dans les déterminations.

La prédiction de la force de cisaillement par la SPIR ou par spectroscopie Raman donne des résultats très variables (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,01 et 0,74) (Andrés et al.,

2008, Cecchinato et al., 2011, De Marchi et al., 2013, Bauer et al., 2016 ; Beattie et al., 2004 ; Fowler et al., 2014). Liao et al., (2010) ont rapporté des valeurs de  $R^2$  d'étalonnage de 0,72 mais seulement de 0,27 pour la validation. D'autres auteurs ont montré que la SPIR permet de prédire la tendreté de la viande de porc après cuisson ( $R^2=0,20$  à  $0,72$ ) (Monteiro Balage et al., 2015 ; Geesink et al., 2006 ; Liao et al., 2010). En ce qui concerne l'application « en ligne », des valeurs de  $R^2$  de 0,35 ont été rapportées par Hoving-Bolink et al. (2005) pour l'estimation de la force de cisaillement sur carcasses de porc. Par ailleurs, dans le cadre de la prédiction « en ligne » de la tendreté du muscle Longissimus Lumborum dans l'abattoir par SPIR, Rust et al. (2008) ont observé que la proportion des muscles certifiés comme tendres bien classés était de 70%. Cette variabilité des résultats pourrait être due selon Leroy et al. (2004), Liu et al. (2003) et De Marchi et al. (2007), à l'homogénéité plus ou moins importante entre les échantillons et des données de référence, mais aussi à la grande variabilité des résultats entre répliquats obtenus par la méthode Warner-Braztler pour un même échantillon (Prieto et al., 2008). Selon De Marchi et al. (2013), l'homogénéisation du muscle (broyage) n'améliore pas, voire dégrade, les valeurs de  $R^2$  obtenues, en raison d'une modification de l'information spectrale dans le proche infrarouge due à l'altération de la structure musculaire.

En résumé, actuellement, l'utilisation des techniques de spectroscopie n'est pas performante pour la prédiction de la qualité sensorielle (tendreté ou force de cisaillement) de la viande. La grande variabilité des résultats obtenus peut s'expliquer en grande partie par l'absence de mesures de références répétables et fiables. Cependant, certains résultats encourageants indiquent le besoin de continuer la recherche afin d'obtenir des modèles adéquats pour la prédiction de la qualité sensorielle de la viande.

## IV.2. Des utilisations en routine pour la qualité nutritionnelle

Si le constat est fait qu'il est encore difficile de prédire la qualité sensorielle des viandes par SPIR, cette technologie a en revanche fait ses preuves pour déterminer la composition chimique et donc la valeur nutritionnelle des viandes.

Ainsi, la teneur en lipides du filet de poulet ou de canard (filets ou magrets) peut être mesurée en routine par SPIR (en remplacement des méthodes chimiques) grâce au développement d'équations de prédiction très robustes. Chez le poulet les  $R^2$  sont compris entre 0,8 et 1,0 et les écarts types de calibration sont proches de 0,2 ( $R^2 = 0,98$ , Abeni et Bergoglio, 2001 et Berzaghi et al., 2005 ;  $R^2 = 0,83$ , Chartrin et al., 2010) ; chez le canard des  $R^2$  de 0,94 et des écart type de calibration de 0,31 ont été publiés (Bastianelli et al., 2008). La composition en acides gras est un caractère important à même d'influencer la qualité nutritionnelle, sensorielle et technologique de la viande. Il est possible d'estimer par la technologie SPIR la teneur des principaux acides gras ainsi que leurs différentes classes (polyinsaturés, monoinsaturés et saturés) avec d'excellents coefficients de détermination ( $> 0,9$ , Berzaghi et al., 2005) pour des échantillons lyophilisés, ceux obtenus sur des échantillons décongelés étant toutefois plus faibles ( $\approx 0,6$ , De Marchi et al., 2011). La teneur en protéines et matière sèche de la viande de poulet peut également être estimée par SPIR sur des échantillons lyophilisés grâce à des modèles caractérisés par des valeurs de  $R^2$  élevées ( $R^2 \approx 0,98$ , écart type  $\approx 0,2$ , Berzaghi et al., 2005). Chez le poulet, les modèles SPIR construits à partir des muscles de la cuisse (plus gras et plus variables) pour prédire la composition chimique, présentent des valeurs de  $R^2$  plus

élevées que ceux développés à partir du filet (Cozzolino, 1996).

Dans le cas de la viande de porc, de nombreux travaux se sont intéressés à la prédiction de sa composition chimique. Des calibrations de qualité variable mais élevée pour certaines ont été établies pour la prédiction du taux de lipides intramusculaires ( $R^2 = 0,28$  à  $0,88$ ) avec une erreur proche d'un point qu'il s'agisse de mesures sur viande intacte, broyée ou salée/séchée (Brondum et al., 2000 ; Hoving-Bolink et al., 2005 ; Savenije et al., 2006 ; Prevolnik et al., 2011 ; Monteiro Balage et al., 2015 ; Vautier et al., 2015). La composition en acides gras, pour ses grandes familles (polyinsaturés, monoinsaturés et saturés), peut également être prédite par SPIR avec une bonne précision ( $R^2 = 0,61$  à  $0,99$ ) pour des analyses réalisées sur gras de bardière (Ripoche et al., 2001 ; Pérez-Marín et al., 2009 ; Mairesse et al., 2012 ; Zamora-Rojas et al., 2013). La précision est à peu près comparable quel que soit le type d'acide gras (erreur d'environ 1 point) mais l'intérêt de la prédiction par SPIR est dépendant du taux de l'acide gras considéré dans le produit : l'erreur relative est inférieure à 5% pour les acides gras saturés et monoinsaturés, fortement représentés, mais elle est plus élevée pour les acides gras polyinsaturés (environ 10%). Les travaux de Gonzalez-Martin (Gonzalez-Martin et al., 2005) montrent qu'il est également possible de prédire le profil en acides gras du gras intramusculaire de la longe de porc Ibérique avec une précision comparable à celle obtenue sur le gras de bardière ( $R^2 > 0,99$  et une erreur d'environ 1 point pour la prédiction des acides gras polyinsaturés, monoinsaturés et saturés).

## IV.3. Des attentes fortes pour la qualité technologique des viandes blanches

L'intérêt de la technologie SPIR pour évaluer les propriétés technologiques de la viande a été particulièrement étudié chez le porc et le poulet. Chez ces derniers, les critères les mieux prédits sont les paramètres de couleur  $a^*$  et  $b^*$  avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,8 (de Marchi, 2010 ; Liu, 2004). Mais l'intérêt d'utiliser la SPIR dans ce cas est limité car il est très facile de mesurer ces critères par spectrophotométrie. La qualité de prédiction du pH ultime, de l'exsudat et des pertes à la cuisson est généralement plus faible avec des coefficients de corrélation compris entre 0,6 et 0,8 (de Marchi, 2010 ; Berzaghi, 2005) laissant toutefois entrevoir des perspectives de développement pour ce type de caractères. Ce n'est en revanche pas le cas pour d'autres caractères comme le pH15 (de Marchi, 2010 ; Liu, 2004) ou la force de cisaillement (de Marchi, 2010, Liu 2004) pour lesquels des coefficients de corrélation  $< 0,5$  ont été obtenus.

La sélection des matières premières selon leur niveau de qualité sensorielle et technologique est aujourd'hui largement répandue dans l'industrie porcine. Cependant, le tri tel qu'il est pratiqué aujourd'hui (mesure du pH ultime) ne couvre que certains aspects de la qualité des viandes et manque de précision en conditions industrielles. Des alternatives à acquisition rapide telles que la SPIR ou la visionique/imagerie hyperspectrale montrent un fort potentiel pour la prédiction de la qualité. La majorité des études s'intéressant à la prédiction du pH ultime rapportent des calibrations caractérisées par des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,65 et 0,87 (Monteiro Balage et al., 2015 ; Candek-Potokar et al., 2006 ; Savenije et al., 2006 ; Liao et al., 2010 ; Kapper et al., 2012 ; Vautier et al., 2016b). L'erreur de prédiction du pH ultime reste toutefois d'un niveau élevé (0,05 à 0,18) comparativement à la répétabilité de la méthode de référence (0,03). De nombreux travaux montrent qu'il est aussi possible

d'établir avec suffisamment de précision des calibrations pour la prédiction de la capacité de rétention d'eau des viandes. C'est notamment le cas pour les pertes par exsudation pour lesquelles des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,31 et 0,76, mais le plus souvent de l'ordre de 0,60, sont rapportés (Brondum et al., 2000 ; Forrest et al., 2000 ; Pedersen et al., 2003, Candek-Potokar et al., 2006 ; Geesink et al., 2006 ; Savenije et al., 2006 ; Prevolnik et al., 2009 ; Boschetti et al., 2013 ; Vautier et al., 2016b). L'erreur de prédiction de l'exsudat reste élevée, entre 1 et 2 points. La prédiction par SPIR du rendement technologique a également été étudiée en viande de porc. Les rares publications disponibles montrent une précision satisfaisante pour le jambon et la longe ( $R^2 = 0,57$  à  $0,78$ ) (Vautier et al., 2013, 2014).

La visionique et l'imagerie hyperspectrale se positionnent comme des technologies à fort potentiel pour le secteur abattage/découpe porcine. En effet, comparativement à la SPIR, elles présentent l'intérêt d'une mesure sans contact et peuvent s'intégrer facilement à une ligne de production car elles ne nécessitent pas l'intervention d'opérateur. Les champs d'applications sont les mêmes que pour la SPIR même si les publications sont aujourd'hui en nombre insuffisant pour conclure sur la précision de ces techniques. Des calibrations en visionique correctement ajustées ont ainsi été établies pour la prédiction du pH ultime de la viande de porc ( $R^2 = 0,49$  à  $0,72$ ) (Chmiel et al., 2016 ; Boutten, 2007 ; Qiao et al., 2007 ; Vautier et al., 2016a), alors que la prédiction du rendement technologique du jambon par cette même technique manque de précision pour être opérationnelle ( $R^2 = 0,31$  à  $0,43$ ) (Vautier et al., 2016). L'analyse hyperspectrale, que l'on peut percevoir comme la combinaison de la visionique et de la SPIR, présenterait des aptitudes pour la prédiction des pertes par exsudation ( $R^2 =$

0,60) (Qiao et al., 2007) et pour la classification des viandes selon leur qualité technologique (catégories PSE (Pale, Soft, Exudative), RFN (Red, Firm and Non- exudative), RSE (Red, Soft and Exudative), 84% de classification correcte) (Liu et

al., 2010). Cette technique de prédiction encore peu développée nécessitera de futurs travaux pour en évaluer la pertinence concernant la prédiction de la qualité de la viande de porc.

## V. DEVELOPPEMENT DE MODELES PHENOTYPIQUES CHEZ LE BOVIN

### V.1. Principes

Les professionnels de la filière viande bovine et les chercheurs australiens ont construit ensemble, dans le cadre d'une stratégie commune et collective, le système MSA (pour « Meat Standards Australia ») qui est un modèle mathématique permettant de prédire la qualité sensorielle de la viande bovine pour chaque combinaison « muscle × méthode de cuisson ». Ce modèle a été construit à partir d'une importante base de tests consommateurs alimentée depuis les années 1990 en suivant un protocole standard (Watson et al., 2008a, 2008b). Une douzaine de paramètres ayant un effet statistiquement significatif sur la qualité sensorielle et caractérisant les animaux (maturité physiologique, poids, type génétique, sexe, etc.), les conditions de pré-abattage et d'abattage (méthode de suspension des carcasses, etc.), la viande (pH, couleur, persillé, etc.) et les événements *post-mortem* (durée de maturation, méthode de cuisson, etc.) ont été introduits dans le modèle en prenant en compte les interactions entre ces paramètres. La chute de la consommation de viande bovine s'est ralentie en Australie depuis que ce modèle a été appliqué par certains acteurs de la filière, suggérant un rapport de cause à effet entre le développement du modèle et le dynamisme du marché australien de la viande bovine

En pratique, l'abattoir constitue le pivot du système, en centralisant les informations concernant les critères

prédicteurs de la qualité. Les carcasses sont évaluées par un classificateur spécifique agréé par le « Meat Livestock Australia » et périodiquement remis à niveau. Le modèle MSA prédit ensuite un score de qualité globale appelé MQ4 (pour « Meat Quality 4 ») sur une échelle de 0 à 100, pour chaque morceau de viande associé à un mode de cuisson et à une durée de maturation. Ce score prédit représente en fait une combinaison linéaire des notes des consommateurs (tendreté, appréciation de la saveur, jutosité et appréciation globale) qui permet de faire le meilleur lien avec le classement de qualité de la viande également renseigné par les consommateurs, les quatre classes de qualité utilisées étant : viande non satisfaisante, viande de qualité courante (3\*), viande de bonne qualité (4\*), viande de qualité supérieure (5\*) (Figure 3). Les coefficients de pondération des notes de tendreté, d'appréciation de la saveur et d'appréciation globale au sein du MQ4 sont de l'ordre de 0,3 pour la tendreté, l'appréciation de la saveur et l'appréciation globale et de 0,1 pour la jutosité. Les valeurs de la note globale MQ4 définissant les limites entre chaque classe de qualité sont calculées précisément pour chaque jeu de données et sont régulièrement affinées : elles sont de l'ordre de 40 (entre non satisfaisant et 3\*), 60 (entre 3\* et 4\*) et 80 (entre 4\* et 5\*) sur une échelle de 0 à 100 (Watson et al., 2008a, 2008b).

**Figure 3 :** Prédiction de la qualité en bouche de la viande bovine pour chaque combinaison muscle × méthode de cuisson à partir d'une douzaine de paramètres et selon la méthodologie du « Meat Standards Australia » (MSA)

**Modèle de prédiction australien MSA**

**Niveau de qualité MSA (3, 4 ou 5 étoiles)**

MSA2000model®		Nom du morceau	Référence du muscle	Jours de maturation	Niveau de qualité MSA (3, 4 ou 5 étoiles)					
					Steak grillé	Bœuf rôti	Sauté	Tranches fines	En cocotte	Corned-beef
Critères expliquant la qualité	Suspension des carcasses	AT	Filet	TDR062	5	4	5			
	Sexe	m	Entrecôtes	CUB045	3	3	3	4		
		0	Faux-Filet	STR045	3	3	3	3		
		0	Paleron	OYS036	4	3	4	4		
	Poids de carcasse	200	Boule de macreuse	BLD096	3	3	3	3	3	
	Ossification	100	Filet mignon	CTR085		3	3	3	3	
		N	Rumsteck	RMP131	3	3	3	3		
	Persillé	130	Partie du rumsteck	RMP231	3	3	3	4		
	Durée de maturation	5	Tranche	KNU099	x	3	3	3	3	
	Epaisseur de gras	5	Gîte noix	OUT005		x	x	3	3	3
	pH	5.40	Rond de gîte	EYE075	x	3	3	3	3	x
		2	Tende de tranche	TOP073	x	3	x	3	3	
Couleur	n	Collier	CHK078		3	3	3	3		
Vitesse de croissance	1.32	Bavette de flanchet	TFL051			3		3		
		Pièce parée	RIB041			3				
		Poitrine	BRI056			x	3	3	x	
		Jarret	FQshin					3		

Le modèle de prédiction permet de classer les échantillons de viande en fonction de différentes classes de qualité : non satisfaisante (x), bon pour une consommation quotidienne (3 étoiles), meilleur que le quotidien (4 étoiles), qualité supérieure (5 étoiles).

## V.2. Applications

Le système MSA a été testé avec succès dans différents pays (revue de Hocquette *et al.*, 2014 ; Allen, 2015 ; Guzek *et al.*, 2015) tels que la Corée du Sud, les Etats-Unis, le Japon, l'Afrique du Sud, la Nouvelle-Zélande, l'Irlande du Nord, la Pologne et la république irlandaise. La conclusion générale est que la méthodologie du système MSA est pertinente dans tous ces pays, même si les poids relatifs de la tendreté, de l'appréciation de la saveur, de la jutosité et de l'appréciation globale dans la définition optimum du score MQ4 varient un peu entre pays, et si les limites optimales entre classes de qualité sont à recalculer pour chaque pays ou pour chaque groupe de consommateurs.

Cette approche a aussi été étudiée en France. Une première étude de dire d'experts a tout d'abord conclu que le système MSA méritait d'être étudié plus avant dans les contextes français et européens. Ce système a été jugé comme rigoureux, pertinent et crédible. En Australie, il a eu le mérite d'avoir fédéré autour de lui un grand nombre d'acteurs professionnels et scientifiques. Cette démarche basée avant tout sur la satisfaction réelle du consommateur est de nature à bousculer les attitudes traditionnelles et les positionnements politiques des acteurs de la filière viande bovine. Il ne s'agit en aucun cas d'un nouveau signe de qualité, mais d'une méthodologie rigoureuse susceptible d'aider les signes de qualité préexistants sans vocation à les concurrencer (Hocquette *et al.*, 2011).

Deux autres études (Legrand *et al.*, 2013) ont permis de montrer expérimentalement que le système MSA permettait de prévoir la qualité de la viande bovine française malgré des différences de type d'animaux (vache et taurillons en France *vs* bouvillons et génisses en Australie) et de degré de cuisson au grill (55°C pour une cuisson « saignante » en France *vs* 74°C pour une viande « bien cuite » en Australie). En France, environ 70% des échantillons de viande sont classés par le modèle MSA dans la classe réellement indiquée par le consommateur (qualité insuffisante, 3\*, 4\* ou 5\*). Ce taux est aussi bon sinon meilleur que celui observé dans les autres pays où le système MSA a été étudié, y compris l'Australie.

## V.3. Perspectives

En raison d'une prédiction satisfaisante de la qualité de la viande, le système MSA est de nature à bouleverser le modèle économique de la filière viande bovine. En effet, les critères de qualité des carcasses (conformation et engraissement selon la grille EUROP) sur lesquels sont payés les éleveurs n'ont pas de relation nette et systématique avec la qualité sensorielle de la viande en bouche (Bonny *et al.*, 2016a). Ceci explique pourquoi un consommateur peut acheter de la viande bovine très chère sans en être nécessairement satisfait, et vice versa : la relation entre le prix de la viande bovine à la distribution et son niveau de qualité est faible, notamment en France (Normand *et al.*, 2014). D'une façon générale, les consommateurs de nombreux pays se disent prêts à payer proportionnellement plus cher une viande de bonne qualité. En d'autres termes, les produits haut de gamme sont de nature à induire un différentiel de prix important avec la viande de tous les jours quel que soit le marché. Ce différentiel varie cependant entre pays et semble assez élevé pour les marchés français et surtout japonais (Lyford *et al.*, 2010 ; Thompson *et al.*, 2010 ; Bonny *et al.*, 2016c). En Australie, la mise en place du système MSA a permis de générer une plus-value économique pour la filière qui, au fil des ans, a été répartie entre les différents acteurs de la filière dans un souci d'équité. Ainsi, il a été calculé que 12,50 \$ de revenus supplémentaires

Il est également potentiellement supérieur à ce que donnent les approches de biochimie (Bonny *et al.*, 2015) ou de génomique (Hocquette *et al.*, 2012). Dans le cas d'une utilisation binaire du système MSA (qualité non satisfaisante *vs* qualité acceptable 3\*, 4\* ou 5\*), la probabilité de vraiment décevoir le consommateur, c'est-à-dire de classer par erreur 3\* ou plus un échantillon de mauvaise qualité, est de 7%. Considérant qu'environ un quart des échantillons de viande a en moyenne une qualité jugée non satisfaisante, l'utilisation binaire de ce système constituerait donc un progrès important permettant de réduire théoriquement de 25 à 7% les déceptions à la consommation, toujours préjudiciables pour un produit déjà peu compétitif par son prix, et d'accroître significativement la régularité de la qualité de la viande proposée aux consommateurs.

Face à l'engouement international pour cette approche qui s'est manifesté lors d'un workshop sur le sujet en 2015 (Pethick *et al.*, 2015), les échanges ont été poursuivis avec des collègues polonais et irlandais professionnels ou académiques, avec pour objectif de construire un modèle européen de prévision de la qualité de la viande bovine inspiré du système MSA. Cela a été discuté lors d'un récent workshop européen (Farmer *et al.*, 2016) et à l'occasion du Congrès de la Fédération Européenne de Zootechnie (Farmer, 2016). Les travaux récents ont montré que les effets du genre (femelle, mâle castré ou mâle entier) et du type racial (race laitière ou à viande) sur la qualité sensorielle de la viande bovine ne sont pas expliqués entièrement par des différences d'âge des animaux ou de caractéristiques de carcasse (poids, engraissement, etc.) : la prise en compte du genre et du type racial permettrait certainement d'améliorer encore la précision de la prédiction de la qualité de la viande en Europe. De plus, l'effet de la maturité physiologique des animaux sur la qualité sensorielle de la viande bovine (prise en compte dans le système MSA) devrait être apprécié en utilisant le degré d'ossification de la carcasse (comme en Australie) pour les animaux jeunes, ou bien l'âge réel des animaux (comme en Europe) pour les animaux plus âgés (Bonny *et al.*, 2016b).

ont été générés pour chaque dollar investi (Anonymous, 2016) pendant 5 ans (2010/11 à 2014/15). En Australie, les producteurs de viande bovine ainsi que les abatteurs et autres acteurs ont donc une réelle incitation financière à produire une viande de bonne qualité sensorielle satisfaisant les consommateurs. Ce n'est pas le cas dans bon nombre de pays qui continuent à rémunérer les acteurs de la filière selon les caractéristiques des carcasses (Polkinghorne *et al.*, 2010), au moins pour le marché de masse.

Le modèle de prédiction MSA ouvre aussi de nouvelles perspectives dans le domaine de la génétique (Pethick *et al.*, 2015). En effet, le potentiel d'un muscle à produire une viande de qualité, pondéré par le poids relatif de ce muscle dans la carcasse, permet de calculer un index global de qualité sensorielle MSA pour la carcasse, en prenant en compte l'ensemble des muscles de cette dernière. Cet index MSA peut être considéré comme le potentiel génétique de chaque animal à produire une viande de qualité sensorielle donnée toutes choses égales par ailleurs (c'est-à-dire à même durée de maturation, à cuisson similaire...). Cet index pourrait être potentiellement introduit dans les schémas de sélection génétique afin d'y inclure le potentiel de qualité sensorielle des animaux, ce qui n'a jamais été réalisé jusqu'à présent.

## VI. REFLEXION CRITIQUE SUR LES AVANCEES ET LES FREINS AU DEVELOPPEMENT

La filière viande est importante en Europe et surtout en France. Toutefois, elle doit faire face à un contexte économique difficile, notamment en raison d'une baisse régulière de la consommation de viande par personne, notamment de viande rouge. Les raisons de cette baisse de consommation sont multiples et incluent l'irrégularité de la qualité sensorielle comme mentionné dans cet article, mais aussi des qualités technologiques ou nutritionnelles. Ces qualités notamment la tendreté chez le bovin sont parfois ou souvent, jugées insuffisantes par les transformateurs, ou par les consommateurs. L'ensemble de ces observations justifie pleinement les recherches analytiques ou technologiques conduites sur la prédiction de ces composantes de qualité. Toutefois, la qualité de la prédiction des différents critères de qualité est souvent modeste. De plus, les opérateurs de la filière viande, de l'élevage à la transformation, dégagent peu de marges et sont de ce fait soucieux de la rentabilité économique de leurs activités. Pour des raisons de coût/bénéfice, ils sont peu enclins à intégrer à leurs pratiques certaines avancées en matière de recherche-développement, ce qui est souvent constaté et regretté par les chercheurs (Troy et Kerry, 2010). La crise économique mentionnée ci-dessus est malheureusement de nature à renforcer ce phénomène.

De plus, force est de constater que les circuits de commercialisation sont de plus en plus complexes, déconnectés de l'animal et de la carcasse, et incluent beaucoup d'intermédiaires entre le producteur et le consommateur. Par ailleurs, les comportements des consommateurs évoluent par leurs lieux d'achat (de moins en moins en boucherie et de plus en plus en grande distribution) et de consommation (davantage hors domicile), par la nature des produits consommés (davantage de produits élaborés ou de portions individuelles) et par leurs attentes qui se sont diversifiées au fil des années incluant aujourd'hui des préoccupations sociales liées notamment au bien-être animal et à la protection de l'environnement. La R&D doit donc élargir largement son champ d'action (Legrand *et al.*, 2016). Alors que les actions de recherche ont largement porté sur les caractéristiques intrinsèques de la viande que sont les qualités sensorielles, technologiques, nutritionnelles (objet de cet article) et sanitaires, les qualités associées au produit (appelées qualités extrinsèques) répondant à des attentes sociétales larges doivent aujourd'hui être prises en compte en interaction avec les premières (Lebret *et al.*, 2015).

D'une façon générale, des travaux de recherche en lien direct avec les attentes des consommateurs sont de plus en plus nécessaires, notamment pour prédire de façon objective les qualités intrinsèques de la viande, mais aussi ses qualités extrinsèques. Encore plus que par le passé, les professionnels doivent être en mesure de s'approprier les innovations

proposées pour en comprendre non seulement les principes, les limites, mais aussi le gain potentiel qu'elles peuvent apporter à court et à plus long termes. De fait, la recherche-développement travaille généralement sur un pas de temps long, souvent jugé peu compatible avec les préoccupations à court terme des professionnels. Parallèlement, les scientifiques doivent être en mesure de prendre en compte les attentes des professionnels et des consommateurs afin d'orienter leurs travaux dans la meilleure direction et de favoriser l'appropriation des innovations technologiques par les acteurs de la filière.

Un fort besoin d'innovation se fait effectivement ressentir pour conquérir de nouveaux marchés notamment à l'export. La prise en compte de la méthodologie australienne (système MSA) qui pourrait devenir un standard international est à ce titre prometteuse. La recherche de prédicteurs biologiques de la qualité conduite dans les différentes espèces, associée aux évolutions technologiques récentes, permet d'envisager à moyen terme des applications sur le terrain. Il est indéniable que l'ensemble de ces recherches a permis des avancées considérables dans la connaissance des mécanismes génétiques et biologiques qui gouvernent l'établissement des différentes composantes de la qualité des viandes. Cette meilleure connaissance de l'élaboration des phénotypes et des gènes qui les contrôlent contribue à la mise au point à terme d'outil d'aide à la sélection (tel que le test génétique de la coloration des viandes développé chez le poulet) mais aussi à l'élaboration d'outils d'aide à la décision et de stratégies de production innovantes adaptées au potentiel biologique des animaux et aux objectifs de production des différentes filières. Un fort besoin d'innovation est également nécessaire pour répondre à certaines attentes sociétales. Le développement des méthodes spectrales permettant d'authentifier par exemple l'alimentation des animaux ou de qualifier nutritionnellement la viande est également prometteur. Enfin, cette revue dont le premier objectif était de faire un tour d'horizon des différents types d'avancées scientifiques dans le domaine de la prédiction de la qualité des viandes, ouvre également des perspectives de réflexion notamment sur la possibilité de combiner les différents types de technologies évoquées. Ainsi, pourrait-on envisager de rechercher des biomarqueurs de phénotypes basés sur des méthodes spectrales ? De la même façon, y-aurait-il un intérêt à considérer dans le modèle MSA les prédicteurs biologiques issus des approches moléculaires à haut débit ou des indicateurs obtenus par méthodes spectrales ? Ce travail d'intégration reste à faire mais devrait sans nul doute contribuer à l'amélioration des outils de prédiction de la qualité des viandes et à leur application ultérieure.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

De nombreuses innovations technologiques basées sur des approches de génomique ou de modélisation, ou sur des méthodes spectrales ou physiques, ont été décrites dans cet article pour prédire certaines qualités intrinsèques de la viande telles que ses qualités sensorielles (tendreté, saveur), technologiques (défaut de déstructuration, pH ultime, rendement technologique) ou nutritionnelles (teneur en lipides, composition en acides gras). La plupart de ces approches nécessitent des travaux complémentaires et des

développements méthodologiques pour être applicables en routine. Cependant, leur aptitude à analyser un grand nombre d'échantillons à un coût réduit, ainsi que leur aptitude à prédire les critères de qualité recherchés, sont des éléments fondamentaux pour susciter l'intérêt des acteurs de la filière. L'appropriation de ces méthodologies par les chercheurs est un premier enjeu et certains valorisent déjà ces outils dans le cadre de leurs travaux sur l'impact des facteurs de production sur la qualité des viandes. L'appropriation par les

professionnels se fera dans un second temps et nécessitera un dialogue accru entre professionnels et chercheurs pour bien définir les objectifs à atteindre mais aussi les conditions requises au développement de ces outils (financières notamment). De plus, la recherche doit également privilégier des outils intégratifs pour prévoir globalement l'ensemble des critères de qualité recherchés, ce qui sous-entend d'une part

la combinaison des innovations décrites dans cet article, mais aussi leur insertion dans une réflexion plus globale incluant une dimension sociologique des questions de recherche. Le but ultime est d'une part de mieux répondre aux attentes des acteurs de la filière et des consommateurs et d'autre part de faciliter l'appropriation des innovations par la filière.

## **Références :**

- Abeni F., Bergoglio G. (2001). Characterization of different strains of broiler chicken by carcass measurements, chemical and physical parameters and NIRS on breast muscle. *Meat Science*, 57, 133-137
- Allen P. (2015). Test du système MSA pour prédire la qualité de la viande bovine irlandaise. *Viandes & Produits Carnés*, VPC-31-1-5.
- Alnahhas N., Berri C., Boulay M., Baéza E., Jégo Y., Baumard Y., Chabault M., Le Bihan-Duval E. (2014). Selecting broiler chickens for ultimate pH of breast muscle: Analysis of divergent selection experiment and phenotypic consequences on meat quality, growth, and body composition traits. *Journal of Animal Science*, 92, 3816-3824.
- Alnahhas N., Le Bihan-Duval E., Baéza E., Chabault M., Chartrin P., Bordeau T., Cailleau-Audouin E., Méteau K., Berri C. (2015). Impact of divergent selection for ultimate pH of pectoralis major muscle on biochemical, histological, and sensorial attributes of broiler meat. *Journal of Animal Science*, 93, 4524 - 4531.
- Andrés S., Silva A., Soares-Pereira A.L., Martins C., Bruno-Soares A.M., Murray I. (2008). The use of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict beef *M. longissimus thoracis et lumborum* quality attributes. *Meat Science*, 78, 217-224.
- Andueza D., Mourot B.P., Aït-Kaddour A., Prache S., Mourot J. (2015). Utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge et de la spectroscopie de fluorescence pour estimer la qualité et la traçabilité de la viande. In: Numéro spécial, Le muscle et la viande. Picard B., Lebret B. (Eds). *INRA Productions Animales*, 28, 197-208.
- Andueza D., Mourot B.P., Hocquette J.F., Mourot J. (2016). Phenotyping of animals and their meats: On-line techniques. In: Toldra, F. Ed. *Lawrie's Meat Science 8<sup>th</sup> edition* (in press)
- Anonymous (2016). Final report. Impact assessment of MLA expenditure 2010-11 to 2014-15. Economic quantification of benefits. Project No.F.EVA.1601 accessed via <http://www.mla.com.au/globalassets/mla-corporate/generic/about-mla/mla-impact-assessment-final-report-2010-11-to-2014-15.pdf>
- Bastianelli D., Bonnal L., Chartrin P., Bernadet M.D., Marie-Etancelin C., Baéza E. (2008). 8<sup>èmes</sup> JPPFG, 30-31 octobre 2008, Arcachon, p 161-164
- Bauer A., Scheier R., Eberle T., Schmidt H. (2016). Assessment of tenderness of aged bovine gluteus medius muscles using Raman spectroscopy. *Meat Science*, 115, 27-33.
- Beattie R.J., Bell S.J., Farmer L.J., Moss B.W., Patterson D. (2004). Preliminary investigation of the application of Raman spectroscopy to the prediction of the sensory quality of beef silverside. *Meat Science*, 66, 903-913.
- Beauclercq S., Nadal-Desbarats L., Hennequet Antier C., Collin A., Tesseraud S., Bourin M., Le Bihan-Duval E., Berri C. (2016). Serum and Muscle Metabolomics for the Prediction of Ultimate pH, a Key Factor for Chicken-Meat Quality. *Journal of Proteome Research*, 15, 1168-1178.
- Berri C. (2015). La viande de volaille : des attentes pour la qualité qui se diversifient et des défauts spécifiques à corriger. *INRA Productions Animales*, 28, 115-118.
- Bertrand D. (2002). La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA Productions Animales*, 15, 209-219.
- Berzaghi P., Dalle Zotte A., Jansson L.M., Andrighetto I. (2005). Near-infrared reflectance spectroscopy as a method to predict chemical composition of breast meat and discriminate between different n-3 feeding sources. *Poultry Science*, 84, 128-136
- Bonnet M., Tournayre J., Cassar-Malek I. (2016). Integrated data mining of transcriptomic and proteomic datasets to predict the secretome of adipose tissue and muscle in ruminants. *Molecular BioSystems*, 12, 2722-2734.
- Bonny S.P.F., Gardner G.E., Pethick D.W., Legrand I., Polkinghorne R.J., Hocquette J.F. (2015). Biochemical measurements of beef are a good predictor of untrained consumer sensory scores across muscles. *Animal*, 9, 179-190.
- Bonny S.P.F., Hocquette J.F., Pethick D.W., Legrand I., Wierzbicki J., Allen P., Farmer L.J., Polkinghorne R.J., Gardner G.E. (2016c). Willingness to pay for beef is similar between different consumer groups. Book of abstracts of the 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Session 16, Theatre 13, page 212.
- Bonny S.P.F., Pethick D.W., Legrand I., Wierzbicki J., Allen P., Farmer L.J., Polkinghorne R.J., Hocquette J.F., Gardner G.E. (2016a). The maturity estimate most accurate in predicting eating quality depends on the age range of the cattle examined. *Animal*, 10, 718-728.
- Bonny S.P.F., Pethick D.W., Legrand I., Wierzbicki J., Allen P., Farmer L.J., Polkinghorne R.J., Hocquette J.F., Gardner G.E. (2016b). European conformation and fat scores have no relationship with eating quality. *Animal*, 10, 996-1006.
- Boschetti L., Ottavian M., Facco P., Barolo M., Serva L., Balzan S., Novelli E. (2013). A correlative study on data from pork carcass and processed meat (Bauernspeck) for automatic estimation of chemical parameters by means of near-infrared spectroscopy. *Meat Science*, 95, 621-628.
- Bouley J., Chambon C., Picard B. (2004). Mapping of bovine skeletal muscle proteins using two-dimensional gel electrophoresis and mass spectrometry. *Proteomics*, 4, 1811-1824.
- Boutten B. (2007). Mise en place d'un tri qualité par vision pour jambon et jambon dépiécé dit 5D. rapport d'étude IFIP, 37p.
- Brondum J., Munck L., Henckel P., Karlsson A., Tornberg E., Engelsen S.B. (2000). Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy. *Meat Science*, 55, 177-185.
- Candek-Potokar M., Prevolnik M., Skrlep M. (2006). Ability of near infrared spectroscopy to predict pork technological traits. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14, 269-277.
- Cassar-Malek I., Delavaud A., Barboiron C., Chambon C., Picard B. (2016). Analyse du protéome de plasma bovin pour rechercher des biomarqueurs de performance de production. Journées d'Animation des Crédits Incitatifs 2016 du Département de Physiologie Animale et Systèmes d'Élevage (JACI Phase 2016), Tours, FRA p. 83.
- Cassar-Malek I., Picard B. (2016). Expression marker-based strategy to improve beef quality. *Scientific World Journal*, 2016, 1-11.
- Cecchinato A., De Marchi M., Penasa M., Albera A., Bittante G. (2011). Near-infrared reflectance spectroscopy predictions as indicator traits in breeding programs for enhanced beef quality. *Journal of Animal Science*, 89, 2687-2695.

- Chartrin P., Rousseau X., Gigaud V., Bastianelli D., Baéza E. (2010). Spectroscopie dans le proche infra-rouge et prédiction de la teneur en lipides du filet de poulet. 13<sup>èmes</sup> Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes, 19-20 octobre 2010, Clermont-Ferrand, p. 69-70
- Chaze T., Hocquette J.-F., Meunier B., Renand G., Jurie C., Chambon C., Journaux L., Rousset S., Denoyelle C., Lepetit J., Picard B. (2013). Biological Markers for Meat Tenderness of the Three Main French Beef Breeds Using 2-DE and MS Approach. In: Proteomics in Foods (eds. by Toldrá F & Nollet LML), pp. 127-146. Springer US.
- Chmiel M., Slowinski M. (2016). The use of computer vision system to detect pork defect. Food Science and Technology, 73, 473-480.
- Cozzolino D., Murray I., Paterson R. (1996). Visible and near infrared reflectance spectroscopy for the determination of moisture, fat and protein in chicken breast and thigh muscle. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 4, 216-223.
- D'Alessandro A., Zolla L. (2013). Meat science: From proteomics to integrated omics towards system biology. J Proteomics 78, 558-77.
- Damon M., Denieul K., Vincent A., Bonhomme N., Wyszynska-Koko J., Lebreton B. (2013). Associations between muscle gene expression pattern and technological and sensory meat traits highlight new biomarkers for pork quality assessment. Meat Science, 95, 744-754.
- Damon M., Vincent A., Cherel P., Frank M., Le Roy P. (2006). Transcriptomic analysis of destructured ham. Paper presented at the 1<sup>st</sup> Conference on Pig. Genomics, 20-21/02, Lodi (ITA).
- De Marchi M., Berzaghi P., Boukha A., Mirisola M., Gallo L. (2007). Use of near infrared spectroscopy for assessment of beef quality traits. Italian Journal of Animal Science, 6, 421-423.
- De Marchi M., Penasa M., Cecchinato A., Bittante G. (2013). The relevance of different near infrared technologies and sample treatments for predicting meat quality traits in commercial beef cuts. Meat Science, 93, 329-335.
- De Marchi M., Pulici C., Battagin C., Penasa M., Rizzi C., Cassandro M. (2010). Prediction of physical and colour characteristics of breast meat by near infrared by spectroscopy. XIII<sup>th</sup> European Poultry Conference, 23-27 Août 2010, Tours
- De Marchi M., Riovanto R., Penasa M., Cassandro M. (2011). Feasibility of the direct application of near-infrared reflectance spectroscopy on intact chicken breasts to predict meat color and physical traits. Meat Science, 90, 653-657
- Farmer L.J. (2016). Beef eating quality: a European journey. Book of abstracts of the 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Session 5, Theatre 6, page 131.
- Farmer, L., Bowe, R., Troy, D., Bonny, S., Birnie, J., Dell'Orto, V., Polkinghorne, R., Wierzbicki, J., De Roest, K., Scollan, N.D., Henchion, M., Morrison, S., Legrand, I., Roehe, R., Hocquette, J.-F., Duhem, K. (2016). Compte-rendu du congrès intitulé "Qualité durable de la viande bovine en Europe". Viandes et Produits Carnés, 32, 1-6.
- Forrest J.C., Morgan M.T., Borggaard C., Rasmussen A.J., Jespersen B.L., Andersen J. R. (2000). Development of technology for the early post mortem prediction of water holding capacity and drip loss in fresh pork. Meat Science, 55, 115-122.
- Fowler S.M., Schmidt H., van de Ven R., Wynn P., Hopkins D.L. (2014). Raman spectroscopy compared against traditional predictors of shear force in lamb *m. longissimus lumborum*. Meat Science, 98, 652-656.
- Gagaoua M., Durand D., Micol D., Sante-Lhoutellier V., Terlouw C., Ellies-Oury M.-P., Boudjellal A., Hocquette J.-F., Picard B. (2014). Qualités sensorielles de la viande et stress oxydant en race angus. 15<sup>èmes</sup> Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes (p. 139-140). Viandes et Produits Carnés. 15<sup>èmes</sup> Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes, Clermont-Ferrand, France, p. 137-138.
- Gagaoua M., Terlouw E.M., Micol D., Boudjellal A., Hocquette J.F., Picard B. (2015). Understanding Early Post-Mortem Biochemical Processes Underlying Meat Color and pH Decline in the Longissimus thoracis Muscle of Young Blond d'Aquitaine Bulls Using Protein Biomarkers. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63, 6799-6809.
- Gatellier P., Sayd T., Promeprat A., Gobert M., Chambon C., Sante-Lhoutellier V. (2014). Identification de marqueurs protéomiques prédictifs de l'oxydation des viandes. Viandes & Produits Carnés VPC-2014-30-2-2, 1-5.
- Geesink G.H., Schreutelkamp F.H., Frankhuizen, R. Vedder H.W., Faber N.M., Kranen R.W., Gerritzen M.A. (2006). Prediction of pork quality attributes from near infrared reflectance spectra. Meat Science, 65, 661-668.
- Gonzalez-Martín I., Gonzalez-Perez C., Alvarez-García N., Gonzalez-Cabrera J.M. (2005). On-line determination of fatty acid composition in intramuscular fat of Iberian pork loin by NIRs with a remote reflectance fiber optic probe. Meat Science, 69, 243-248.
- Gruffat, D., Picard, B., Bauchart, D., Micol, D. (2015). La viande bovine : les principales qualités recherchées. INRA Productions Animales, 28, 99-104.
- Guillemin N., Bonnet M., Jurie C., Picard B. (2011). Functional analysis of beef tenderness. Journal of Proteomics, 75, 352-365.
- Guillemin N., Cassar-Malek I., Hocquette J.F., Jurie C., Micol D., Listrat A., Levéziel H., Renand G., Picard B. (2009a). La maîtrise de la tendreté de la viande bovine : un futur proche. I. Approche biologique et identification de marqueurs. INRA Productions Animales, 22, 331-344.
- Guillemin N., Meunier B., Jurie C., Cassar-Malek I., Hocquette J.F., Levéziel H., Picard B. (2009b). Validation of a Dot-Blot quantitative technique for large scale analysis of beef tenderness biomarkers. Journal of Physiological Pharmacology, 60 Suppl 3, 91-97.
- Guzek D., Glabska D., Gutkowska K., Wierzbicki J., Wozniak A., Wierzbicka A. (2015). Influence of cut and thermal treatment on consumer perception of beef in polish trials. Pakistan Journal of Agricultural Science, 52, 1-6.
- Hamill R.M., McBryan J., McGee C., Mullen A.M., Sweeney T., Talbot A. (2012). Functional analysis of muscle gene expression profiles associated with tenderness and intramuscular fat content in pork. Meat Science, 92, 44-450.
- Hocquette J.-F., Bernard-Capel C., Vidal V., Jesson B., Levéziel H., Cassar-Malek I. (2012). The GENOTEND chip: a new tool to analyse gene expression in muscles of beef cattle for beef quality prediction. BMC Veterinary Research, 8, 135.
- Hocquette J.F., Legrand I., Jurie C., Pethick D.W., Micol D. (2011). Perception in France of the Australian system for the prediction of beef quality (MSA) with perspectives for the European beef sector. Animal Production Science, 51, 30-36.
- Hocquette J.F., Van Wezemael L., Chriki S., Legrand I., Verbeke W., Farmer L., Scollan N.D., Polkinghorne R.J., Rødbotten R., Allen P., Pethick D.W. (2014). Modelling of beef sensory quality for a better prediction of palatability. Meat Science, 97, 316-322.
- Hoving-Bolink A.H., Vedder H.W., Merks J.W.M., de Klein W.J.H., Reimert H.G.M., Frankhuizen R., van den Broek W.H.A.M., Lambooy E. (2005). Perspective of NIRS measurements early post mortem for prediction of pork quality. Meat science, 69, 417-423.
- Jia X., Veiseth-Kent E., Grove H., Kuziora P., Aass L., Hildrum K.I., Hollung K. (2009). Peroxiredoxin-6--a potential protein marker for meat tenderness in bovine longissimus thoracis muscle. Journal of Animal Science, 87, 2391-2399.
- Jlali M., Graulet B., Chauveau-Duriot B., Chabault M., Godet E., Leroux S., Praud C., Le Bihan-Duval E., Duclos M.J., Berri C. (2012). A mutation in the promoter of the chicken  $\beta$ , $\beta$ -carotene 15,15'-monooxygenase 1 gene alters xanthophyll metabolism through a selective effect on its mRNA abundance in the breast muscle. Journal of Animal Science, 90, 4280-4288.
- Jlali, M., B. Graulet, B. Chauveau-Duriot, E. Godet, C. Praud, C. Simoes Nunes, E. Le Bihan-Duval, C. Berri, Duclos M.J. (2014). Nutrigenetics of carotenoid metabolism in the chicken: a polymorphism at the  $\beta$ ,  $\beta$ -carotene 15,15'-mono-oxygenase 1 (BCMO1) locus affects the response to dietary  $\beta$ -carotene. British Journal of Nutrition, 111, 2079-2088.
- Kapper C., Klont R.E., Verdonk J.M.A.J., Urlings H.A.P. (2012). Prediction of pork quality with near infrared spectroscopy (NIRS). I. Feasibility and robustness of NIRS measurements at laboratory scale. Meat Science, 91, 294-299.

- Laville E., Sayd T., Terlouw C., Chambon C., Damon M., Larzul C., Leroy P., Glénisson J., Chérel P. (2007). Comparison of sarcoplasmic proteomes between two groups of pig muscles selected for shear force of cooked meat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 5834-5841.
- Le Bihan-Duval E., Nadaf J., Berri C., Duclos M., Pitel F. (2010). Marqueurs génétiques pour la coloration de la viande, Brevet déposé le 2008/08/25, n° EP2161345A1. Brevet international.
- Le Bihan-Duval E., Nadaf J., Berri C., Pitel F., Graulet B., Godet E., Leroux S., Demeure O., Lagarrigue S., Duby C., Cogburn L.A., Beaumont C., Duclos M.J. (2011). Detection of a Cis eQTL controlling BMCO1 gene expression leads to the identification of a QTG for chicken breast meat color. *Plos One* 6, online(7).
- Le Bihan-Duval E., Debut M., Berri C.M., Sellier N., Sante-Lhoutellier V., Jégo Y., Beaumont C. (2008). Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *BMC Genetics*, 9(53), 6 p.
- Lebret B., Denieul K., Vincent A., Bonhomme N., Wyszynska-Koko J., Kristensen L., Young J.F., Damon M. (2013). Identification par transcriptomique de biomarqueurs de la qualité de la viande de porc. *Journées de la Recherche Porcine*, 45, 97-102
- Lebret B., Ecolan P., Bonhomme N., Méteau K., Prunier A. (2015). Influence of production system in local and conventional pig breeds on stress indicators at slaughter, muscle and meat traits and pork eating quality. *Animal*, 9, 1404-1413.
- Lebret B., Castellano R., Vincent A., Faure J., Kloareg M. (2016). Biomarqueurs pour discriminer des classes de qualité sensorielle et technologique des viandes de porc. 16<sup>èmes</sup>, Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Paris. p. 33-34.
- Lebret B., Faure J. (2015). La viande et les produits du porc : comment satisfaire des attentes qualitatives variées ? *INRA Productions Animales*, 28, 111-114.
- Lebret B., Picard B. (2015). Les principales composantes de la qualité des carcasses et des viandes dans les différentes espèces animales. *INRA Productions Animales*, 28, 93-98.
- Lebret B., Prache S., Berri C., Lefèvre F., Bauchart D., Picard B., Corraze G., Médale F., Faure J., Alami Durante H. (2015). Qualités des viandes : influences des caractéristiques des animaux et de leurs conditions d'élevage. *INRA Productions Animales*, 28(2), 151-168.
- Legrand I., Hocquette J-F., Denoyelle C., Bièche-Terrier C. (2016). La gestion des nombreux critères de qualité de la viande bovine : une approche complexe. *INRA Productions Animales*, 29, 185-200.
- Legrand I., Hocquette J-F., Polkinghorne R.J., Pethick D.W. (2013). Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, 7, 524-529.
- Leroy B., Lambotte S., Dotreppe O., Lecocq H., Istasse L., Clinquart A. (2004). Prediction of technological and organoleptic properties of beef longissimus thoracis from near infrared reflectance and transmission spectra. *Meat Science*, 66, 45-54.
- Liao Y.T., Fan Y.X., Cheng F. (2010). On-line prediction of fresh pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Science*, 86, 901-907.
- Listrat A., Lebret B., Louveau I., Astruc T., Bonnet M., Lefaucheur L., Bugeon J. (2015). Comment la structure et la composition du muscle déterminent la qualité des viandes ou chairs. *INRA Productions Animales*, 28, 215-136.
- Liu J., Damon M., Guitton N., Guisle I., Ecolan P., Vincent A. (2009). Differentially expressed genes in pig Longissimus muscles with contrasting levels of fat, as identified by combined transcriptomic, reverse transcription PCR, and proteomic analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 3808-3817.
- Liu L., Ngadi M.O., Prasher S.O., Gariépy C. (2010). Categorization of pork quality using Gabor filter-based hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Engineering*, 99, 284-293.
- Liu Y., Lyon B.G., Windham W.R., Lyon C.E., Savage E.M. (2004). Principal component analysis of physical, color, and sensory characteristics of chicken breasts deboned at two, four, six, and twenty-four hours *postmortem*. *Poultry Science*, 83, 1467-1474
- Liu Y., Lyon B.G., Windham W.R., Realini C.E., Pringle T.D.D., Duckett S. (2003). Prediction of color, texture, and sensory characteristics of beef steaks by visible and near infrared reflectance spectroscopy. A feasibility study. *Meat Science*, 65, 1107-1115.
- Lobjois V., Liaubet L., SanCristobal M., Le Roy P., Cherel P., Hately F. (2006). Etude d'un critère de qualité de la viande, la tendreté, par l'analyse du transcriptome du muscle porcine (*Longissimus dorsi*). *Journées de la Recherche Porcine*, 38, 97-104
- Lyford C., Thompson J., Polkinghorne R., Miller M., Nishimura T., Neath K., Allen P., Belasco E. (2010). Is willingness to pay (WTP) for beef quality grades affected by consumer demographics and meat consumption preferences? *Australasian Agribusiness Review* 18, 1-15.
- Mairesse G., Douzenel P., Mourot J., Vautier A., Le Page R., Goujon J.M., Poffo L., Sire O., Chesneau G. (2012). La spectroscopie proche infrarouge : outil d'analyse rapide sur carcasse de la teneur en acides gras polyinsaturés n-3 des gras de bardière du porc charcutier. *Journées de la Recherche Porcine*, 44, 211-212.
- Monteiro Balage J., Silva S.L., Abdalla Gomide C., Bonin M.N., Figueira A.C. (2015). Predicting pork quality using Vis/NIR spectroscopy. *Meat Science*, 108, 37-43.
- Morzel M., Terlouw C., Chambon C., Micol D., Picard B. (2008). Muscle proteome and meat eating qualities of *Longissimus thoracis* of "Blonde d'Aquitaine" young bulls: central role of HSP27 isoforms. *Meat Science* 78, 297-304.
- Normand J., Rubat E., Evrat-Georgel C., Turin F., Denoyelle C. (2014). A national survey of beef tenderness in France. *Viandes et Produits Carnés*, VPC-2014-30-5.
- Ouali A., Gagaoua M., Boudida Y., Becila S., Boudjellal A., Herrera-Mendez C.H., Sentandreu M.A. (2013). Biomarkers of meat tenderness: present knowledge and perspectives in regards to our current understanding of the mechanisms involved. *Meat Science*, 95, 854-70.
- Oury M-P., Picard B., Istasse L., Micol D., Dumont R. (2007). Mode de conduite en élevage et tendreté de la viande bovine. *INRA Productions Animales*, 29 (4), 309-326.
- Pedersen D.K., Morel S., Andersen H.J., Engelsen S.B. (2003). Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy. *Meat Science*, 65, 581-592.
- Pérez-Marín D., De Pedro Sanz E., Guerrero-Ginel J.E., Garrido-Varo A. (2009). A feasibility study on the use of near-infrared spectroscopy for prediction of the fatty acid profile in live Iberian pigs and carcasses. *Meat Science* 83, 627-633.
- Pethick D.W., Thompson J., Polkinghorne R., Bonny S.P.F., Tarr G., Treford P., Sinclair D., Frette F., Wierzbicki J., Crowley M., Gardner G.E., Allen P., Nishimura T., McGilchrist P., Farmer L., Meng Q., Scollan N., Duhem K., Hocquette J.F. (2015). Beef and Lamb carcass grading to underpin consumer satisfaction. *Viandes & Produits Carnés*, VPC-2015-31-4-3.
- Picard B., Gagaoua M., Micol D., Cassar-Malek I., Hocquette J.F., Terlouw C.E. (2014). Inverse relationships between biomarkers and beef tenderness according to contractile and metabolic properties of the muscle. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 62, 9808-9818.
- Picard B., Jurie C., Garcia-Launay F., Méteau K., Agabriel J., Micol D. (2011). Marqueurs des qualités sensorielles de la viande bovine en race Salers. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, 18, 181-184.
- Picard B., Lebret B., Cassar Malek I., Liaubet L., Berri C., Le Bihan-Duval E., Lefèvre F., Hocquette J.-F., Renand G. (2015). Des marqueurs génomiques au service de la qualité de la viande. *INRA Productions Animales*, 28, 183-195.
- Picard B., Lefèvre F., Lebret B. (2012). Meat and fish flesh quality with proteomic applications. *Animal Frontiers*, 2(4), 18-25.

- Polkinghorne R. (2005). Does variation between muscles in sensory traits preclude carcass grading as a useful tool for consumers? 51<sup>st</sup> International Congress of Meat Science and Technology. August 7-12 Maryland, USA.
- Prevolnik M., Candek-Potokar M., Novic M., Škorjanc D. (2009). An attempt to predict pork drip loss from pH and colour measurements or near infrared spectra using artificial neural networks. *Meat Science*, 83, 405-411.
- Prevolnik M., Škrlep M., Janež L., Velikonja-Bolta Š., Škorjanc D., Candek-Potokar M. (2011). Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham. *Meat Science*, 88, 299-304.
- Prieto N., Andrés S., Giráldez F.J., Mantecón A.R., Lavín P. (2008). Ability of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to estimate physical parameters of adult steers (oxen) and young cattle meat samples. *Meat Science*, 79, 692-699.
- Prieto N., Roehe R., Lavín P., Batten G., Andrés S. (2009). Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: A review. *Meat Science*, 83, 175-183.
- Qiao J., Wang N., Ngadi M.O., Gunenc A., Monroy, M. Garipey C., Prasher S.O. (2007). Prediction of drip-loss, pH, and color for pork using a hyperspectral imaging technique. *Meat Science*, 76, 1-8.
- Ripoche A., Guillard A.S. (2001). Determination of fatty acid composition of pork fat by Fourier transform infrared spectroscopy. *Meat Science*, 58, 299-304.
- Ripoll G., Albertí P., Panea B., Olleta J.L., Sañudo C. (2008). Near infrared reflectance spectroscopy for predicting chemical, instrumental and sensory quality of beef. *Meat Science*, 80, 697-702.
- Rust S.R., Price D.M., Subbiah J., Kranzler G., Hilton G.G., Vanoverbeke D.L., Morgan J.B. (2008). Predicting beef tenderness using near-infrared spectroscopy. *Journal of Animal Science*, 86, 211-219.
- Savenije B., Geesink G.H., van der Palen J.G.P., Hemke G. (2006). Prediction of pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Science*, 73, 181-184.
- Sibut V., Le Bihan-Duval E., Tesseraud S., Godet E., Bordeau T., Cailleau-Audouin E., Chartrin P., Duclos M.J., Berri C. (2008). Adenosine monophosphate-activated protein kinase involved in variations of muscle glycogen and breast meat quality between lean and fat chickens. *Journal of Animal Science*, 86, 2888-2896
- Sibut, V., C. Hennequet Antier, E. Le Bihan-Duval, S. Marthey, M. J. Duclos, Berri C. (2011). "Identification of differentially expressed genes in chickens differing in muscle glycogen content and meat quality." *BMC Genomics*, 12, online.
- Thompson J., Polkinghorne R. P., Gee A., Motiang D., Strydom P., Mashau M., Ng'ambi J., deKock R., Burrow H. (2010). Beef palatability in the Republic of South Africa: implications for niche-marketing strategies. *ACIAR TECHNICAL REPORTS (Vol. 72): Australian Centre for International Agricultural Research ACIAR*.
- Troy D.J., Kerry J.P. (2010). Consumer perception and the role of science in the meat industry, *Meat Science*, 86, 214-226.
- Vautier A., Gault E., Lhommeau T., Bozec A. (2014). Meat quality mapping of the loin: pH vs NIR spectroscopy to predict the cooking yield. 60<sup>th</sup> International Congress of Meat Science and Technology, Punta del Este, Uruguay.
- Vautier A., Lhommeau T., Chevillon P. (2015). NIRS prediction of intramuscular fat content of pork loins: effect of the acquisition surface. 61<sup>st</sup> International Congress of Meat Science and Technology, Clermont-Ferrand, France.
- Vautier A., Lhommeau T., Dumas G. (2013). A feasibility study for the prediction of the technological quality of ham with NIR spectroscopy. Book of abstracts of the 64<sup>th</sup> European Federation of Animal Science (EAAP), Nantes, France. Session 02, Theatre 16, page 108.
- Vautier A., Monziols M., Lhommeau T., Gault E. (2016). Prediction of PSE-like zones, ultimate pH and cooking yield by computer image analysis of deboned hams. 62<sup>nd</sup> International Congress of Meat Science and Technology, Bangkok, Thailand.
- Vautier A., Pieper T., Lhommeau T., Christensen M. (2016). Application industrielle NIRS pour la prédiction de la capacité de rétention en eau de la viande de porc. 16<sup>èmes</sup> Journées Scientifiques du Muscle et des Technologies de la Viande, Paris, France. p. 43-45.
- Venel C., Mullen M., Downey G., Troy D.J. (2001). Prediction of tenderness and other quality attributes of beef by near infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1100 nm. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 9, 185-198.
- Watson R., Gee A., Polkinghorne R., Porter M. (2008b). Consumer assessment of eating quality – development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(11), 1360-1367.
- Watson R., Polkinghorne R., Thompson J.M. (2008a). Development of the Meat Standards Australia (MSA) prediction model for beef palatability. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(11), 1368-1379.
- Yang D., Ying Y. (2011). Applications of Raman spectroscopy in agricultural products and food analysis: A review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46, 539-560.
- Zamora-Rojas E., Garrido-Varo A., De Pedro-Sanz E., Guerrero-Ginel J.E., Pérez-Marín D. (2013). Prediction of fatty acids content in pig adipose tissue by near infrared spectroscopy: At-line versus in-situ analysis. *Meat Science*, 95, 503-511.