



Les enjeux du phénotypage des animaux d'élevage pour la qualité des produits carnés

Intérêts et limites du phénotypage à haut débit des animaux d'élevage pour répondre aux enjeux autour de la qualité des produits carnés

Mots-clés : viande, qualité, phénotypage

Auteurs : E. Le Bihan-Duval^{1*}, R. Talon², J.F. Hocquette^{3,4}

¹Inra, UR83, Recherches Avicoles, 37380 Nouzilly, France ; ²Inra, UR0454, Microbiologie, Centre de Clermont-Ferrand Theix, 63122 Saint Genès-Champanelle, France ; ³Inra, UMR1213, Recherches sur les Herbivores, Centre de Clermont-Ferrand Theix, 63122 Saint Genès-Champanelle, France ; ⁴Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213, Recherches sur les Herbivores, Centre de Clermont-Ferrand Theix, 63122 Saint Genès-Champanelle, France

* E-mail de l'auteur correspondant : Elisabeth.Duval@tours.inra.fr

Le phénotypage à haut débit repose sur des technologies rapides, faciles d'utilisation, standardisées et si possible non destructives. Il est de nature à mieux prédire la qualité des produits carnés, à identifier de nouvelles voies de valorisation de ces produits, et à promouvoir la diversité des systèmes d'élevage.

Résumé :

Dans un contexte d'évolution de la nature des demandes vis-à-vis des produits carnés issus des animaux d'élevage, les projets de recherche-développement en sciences animales et agronomiques doivent être plus systémiques et prédictifs. La mise en place de programmes de phénotypage avec des méthodes à haut débit standardisées a pour ambition d'établir des relations fonctionnelles de plus en plus fines entre le génotype des animaux, leurs phénotypes et les caractéristiques de leurs produits dans une perspective d'élevage durable au sein des différentes filières animales (ruminants, porcins, volailles). Ces nouvelles approches impliquent (i) le développement et la standardisation de méthodes rapides que ce soit pour la détection et la quantification des contaminants biologiques ou chimiques ou pour l'estimation de la qualité des produits, (ii) la mise au point de méthodes alternatives aux mesures analytiques de la composition et des propriétés techno-fonctionnelles des produits grâce à des technologies innovantes utilisables en routine (méthodes optiques ou par imagerie, méthodes physiques non invasives, etc.), et/ou (iii) la recherche et la validation de marqueurs biologiques précoces de la qualité (marqueurs génétiques, expression de gènes ou de protéines, teneurs en métabolites) ainsi que le développement de méthodes utilisables en routine pour étudier ces marqueurs afin de développer des modèles fiables de prédiction de la qualité des produits carnés.

Abstract: Challenges of livestock phenotyping for the quality of meat products

In a context of changing expectations for meat products from livestock, the research and development of animal and agricultural sciences should be more systemic and predictive. The implementation of programs with high-throughput phenotyping methods is aimed at establishing finer and finer functional relationships between the genotype of animals, their phenotypes and characteristics of their products with the perspective of sustainable farming in the different animal sectors (ruminants, pigs, poultry). These new approaches involve (i) the development and standardization of rapid methods both for the detection and quantification of biological or chemical contaminants or estimation of the quality of the animal products, (ii) the development of alternative methods to replace analytical measurements for the composition and technico-functional properties of products through innovative technologies used in routine (optical or imaging methods, non-invasive physical methods, etc.) and / or (iii) research and validation of early biological markers of quality (genetic markers, gene expression or protein levels of metabolites) and the development of methods used routinely to study these markers in order to develop reliable models to predict the quality of meat products.

INTRODUCTION

Le développement de nouveaux outils performants à haut débit pour permettre la détermination des caractéristiques, des performances, et plus généralement des phénotypes des animaux, est un des verrous importants à la progression des connaissances. Cette évolution a conduit au concept du phénotypage à haut débit qui peut être défini comme suit : « méthode de détermination de phénotypes mesurables de façon répétable, automatisable et rapide de sorte que le processus de mesure génère un grand nombre de données » (Hocquette *et al.*, 2011). Le phénotype porte sur un ou plusieurs caractères observables d'un individu. Il dépend du génotype de l'individu, c'est-à-dire de l'expression de ses gènes, mais également des effets du milieu. Le phénotypage fin (phénotypage approfondi pour une famille spécifique de caractères) et le phénotypage à haut débit ont ainsi été identifiés comme l'un des principaux défis par l'Inra (Herpin, 2009) et par les instituts techniques et les organisations professionnelles des filières animales (Hocquette *et al.*, 2011). En effet, le développement de l'élevage de précision, l'accès à des techniques d'exploration fonctionnelle toujours plus performantes, les innovations en cours de déploiement (sélection génomique) ou à venir (nutrigénomique), la diversification des caractères de sélection à prendre en compte pour répondre aux attentes des producteurs, des industriels de la transformation, des distributeurs, des consommateurs et des citoyens (critères environnementaux, bien-être animal, etc.) sont autant d'éléments qui justifient l'intérêt du phénotypage fin et à haut débit des animaux d'élevage.

Dans ce contexte, l'obtention d'informations phénotypiques précises, fiables, répétables et comparables entre pays, laboratoires ou entreprises est critique pour acquérir une bonne compréhension du déterminisme de la qualité des produits. Aujourd'hui, il est en effet difficile de combiner différentes sources de données phénotypiques en raison notamment de la variabilité dans les méthodes de phénotypage. C'est pourquoi, un préalable est de pouvoir

disposer d'un langage commun avec des définitions partagées et non équivoques des caractères et de leur mode de mesures. C'est l'objectif du programme « Animal Trait Ontology for Livestock » (ATOL) développé à l'Inra en collaboration avec l'Université d'Etat d'Iowa (USA) dont l'objectif est de définir précisément les caractères phénotypiques d'intérêt (Hurtaud *et al.*, 2011). Ensuite, il sera nécessaire de prioriser les phénotypes d'intérêt et les méthodes associées afin d'interpréter de façon non équivoque les différences phénotypiques entre animaux. Cependant, plusieurs consortiums internationaux proposent d'ores et déjà des méthodes standardisées pour le contrôle des performances des animaux d'élevage comme par exemple ICAR (« International Committee for Animal Recording ») en ce qui concerne principalement les bovins laitiers (ICAR, 2012) ou la BIF (« Beef Improvement Federation ») en ce qui concerne les bovins à viande (BIF, 2010). Toutefois, des caractères complexes ou difficiles à mesurer en routine (comme la tendreté de la viande) ou encore des caractères fonctionnels qui sont de plus en plus importants (par exemple la robustesse) ne font pas encore l'objet de méthodes standardisées. Il y a donc besoin de travaux de recherche et développement sur ces caractères particuliers. Ces travaux sont notamment nécessaires pour mettre en relation les nombreux marqueurs génétiques issus des travaux de séquençage avec ces phénotypes afin d'exploiter au mieux les potentialités de la sélection génomique.

Cet article se propose tout d'abord de rappeler les enjeux du phénotypage des animaux d'élevage pour la production et la société en termes de la qualité des produits carnés. Il sera ensuite précisé quels sont les enjeux et les verrous scientifiques et technologiques du phénotypage des animaux d'élevage. Nous concluons par les perspectives et les limites à l'amélioration du phénotypage animal dans le cadre de la production de viande.

I. ENJEUX POUR LA PRODUCTION ET LA SOCIÉTÉ EN TERMES D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES PRODUITS CARNÉS

La qualité est une notion qui traduit l'aptitude du produit à répondre aux attentes du consommateur et plus largement aux demandes d'un marché (Luning *et al.*, 2002). Or, depuis les années 60, la consommation alimentaire française et européenne a connu de nombreuses évolutions. Reflet de la hausse du niveau de vie des ménages, la part de l'alimentation dans les dépenses de consommation des ménages français est passée de plus de 21% en 1959 à environ 13% en 2010 (Hanne et Roux, 2012). En 2010, le poste « alimentation » demeurait toutefois le troisième poste de consommation après les postes « logement, chauffage, éclairage » et « transport ». Sur la même période, les modes de consommation se sont aussi largement diversifiés avec le maintien ou la progression dans certaines filières des productions sous signe de qualité (de type produits biologiques, AOC, Label Rouge, ou certifiés) et l'augmentation de la consommation des produits élaborés. Ces évolutions s'expliquent, d'une part, par l'attention croissante portée à l'impact de l'alimentation sur la santé humaine et aux modes d'élevage et, d'autre part, par les contraintes de la vie moderne et la recherche par les

consommateurs de produits plus pratiques et rapides à consommer. Les consommations par produit ont elles aussi évolué (alim'agri, 2011) avec, notamment, une diminution pour la viande (moins 12 kg par habitant entre 1995 et 2008).

La qualité résulte de nombreuses propriétés intrinsèques au produit et de leurs possibles interactions. En France et dans les pays du sud de l'Europe, la qualité fait largement référence aux aptitudes culinaires et au goût des produits qui déterminent leur qualité sensorielle. Avec la qualité sanitaire qui reste un enjeu majeur de santé publique, les consommateurs des pays développés accordent une importance croissante à la qualité nutritionnelle en lien avec la valeur « santé » des aliments et les problèmes d'obésité (Dockès *et al.*, 2011). L'augmentation de la part de marché des produits découpés ou transformés implique par ailleurs d'améliorer la qualité technologique qui détermine l'aptitude à la conservation et à la transformation. Il existe de possibles antagonismes entre ces différentes composantes de la qualité, qui font qu'il n'existe pas d'aliment « parfait » mais que l'on peut chercher à tendre vers un optimum. Ainsi, si

les viandes sont une source importante de protéines et de micronutriments nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme humain, certaines contiennent en proportion plus de matières grasses saturées que les végétaux et de cholestérol qui, consommés en trop grande quantité, peuvent potentiellement augmenter les risques de maladies cardiovasculaires et de pathologies liées à l'obésité. Dans le même temps, un bon équilibre entre les différentes familles d'acides gras peut avoir un effet bénéfique sur la santé humaine. De plus, réduire la teneur en lipides de la viande pour améliorer sa qualité nutritionnelle n'est pas sans conséquence sur sa qualité sensorielle car flaveur ou jutosité et teneur en gras sont souvent liées. Au-delà des qualités intrinsèques (sensorielle, nutritionnelle, sanitaire, technologique) du produit, le choix d'un aliment par le consommateur est aussi influencé par ses caractéristiques extrinsèques faisant appel au mode d'élevage (respect de l'environnement, du bien-être des animaux), de commercialisation (préférence accordée aux produits locaux, traçabilité) ou aux variables de marché. Ainsi, le facteur prix constitue encore aujourd'hui le principal critère d'achat (revue de Hocquette *et al.*, 2013).

S'il n'existe pas de définition simple de la qualité, un objectif important des filières de productions animales est de pouvoir apporter des garanties de qualité au consommateur quel que soit le type de produit ou le mode de production

concerné. Par ailleurs, il est également important pour les opérateurs de maîtriser la variabilité non contrôlée de la qualité entre différents échantillons du même produit. Répondre à ces enjeux suppose de pouvoir objectiver les qualités intrinsèques de l'aliment à partir de mesures fiables et applicables à large échelle à un coût acceptable au niveau des filières. Cet aspect est particulièrement important dans le contexte européen de diversification de la production où le consommateur doit avoir une vision éclairée des qualités sensorielle, nutritionnelle et sanitaire des produits issus des différentes filières (standard, bio, Label-Rouge, AOC, etc.). Garantir et maîtriser la variabilité de la qualité suppose de choisir les animaux avec les aptitudes génétiques les mieux adaptées, et d'optimiser en fonction les modes de production, la transformation et/ou la commercialisation du produit. Ceci montre l'importance de pouvoir disposer d'indicateurs précoces de la qualité permettant de prédire à partir du produit initial (muscle) et si possible au cours de la vie de l'animal la qualité finale de la viande. La sélection génétique ou le diagnostic de la qualité en élevage ou à l'abattoir requièrent des mesures qui soient à la fois pertinentes (c'est-à-dire corrélées à la qualité du produit final), suffisamment rapides et de coût acceptable, et qui ne compromettent pas le devenir du produit ou de l'animal, c'est-à-dire non destructives et si possible non invasives.

Les enjeux du phénotypage autour de la question de la qualité des produits carnés sont donc :

- **De recueillir les perceptions des consommateurs-citoyens autour des produits carnés pour répondre au mieux à la multiplicité croissante de leurs attentes,**
- **De caractériser plus finement les produits animaux afin de répondre objectivement et le plus possible à ces attentes,**
- **De choisir ou de sélectionner et aussi d'élever des animaux dont les produits répondront le mieux à ces mêmes attentes.**

II. SIGNIFICATION BIOLOGIQUE DU PHENOTYPE ET VERROUS DE CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE

Alors que le niveau d'élaboration des produits augmente, les études d'opinion auprès des consommateurs montrent leur recherche de plus de « naturalité ». Cette tendance est aujourd'hui largement reprise par l'industrie agroalimentaire avec le concept du « clean label » ou étiquetage propre qui se traduit par la réduction voire la suppression d'additifs alimentaires (conservateurs, arômes, texturants, etc.) (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2012). Ces évolutions montrent la nécessité d'améliorer le niveau et l'homogénéité de la qualité dès l'élevage des animaux pour limiter autant que possible les ajouts ou traitements ultérieurs dans les phases de conservation ou de transformation du produit. La maîtrise de la qualité du produit final passe donc par une étape de caractérisation de la qualité du produit initial et par la connaissance de ses facteurs de variation en lien avec les conditions d'élevage, d'abattage et la génétique.

Comme l'ont montré les nombreuses recherches menées depuis déjà plusieurs années, il existe de réelles possibilités d'améliorer les qualités nutritionnelles et la valeur santé des aliments en jouant sur l'alimentation animale. La reconstitution d'une alimentation humaine utilisant des produits d'animaux nourris avec des graines de lin (riches en oméga-3) montre un doublement de l'apport en oméga-3 de type ALA (acide alpha-linolénique) et une diminution d'un facteur 2 du rapport oméga-6/ALA (passant de 14,9 à 6,8) qui se rapproche alors des recommandations nutritionnelles

(autour de 5) (Bourre, 2005). Comme pour les acides gras, d'autres recherches seraient nécessaires pour étudier les possibilités d'améliorer, grâce aux produits animaux, les apports en d'autres micronutriments en quantité insuffisante dans l'alimentation occidentale comme le fer (pour l'oxygénation des organes et la production d'énergie) ou la vitamine E (antioxydant majeur). De façon plus générale et dans le contexte d'augmentation du coût des matières premières destinées à l'alimentation animale, les recherches en nutrition animale devront à court terme intégrer les effets de l'utilisation de matières premières alternatives moins en concurrence avec l'homme et plus renouvelables (ressources locales, coproduits, etc.) dans la détermination de la qualité des produits.

Au niveau génétique, un premier niveau d'approche est de tirer profit de la diversité des races ou des souches pour valoriser le mieux possible la qualité de leurs produits carnés en lien avec le mode d'élevage. Ainsi chez les volailles, la segmentation entre les productions Label Rouge et standard a reposé sur l'utilisation de souches différentes, abattues pour le poulet de chair à un âge minimal de 81 jours (contre 35-40 pour le poulet standard) leur garantissant une qualité sensorielle différente de celle du produit standard (Sauveur, 1997). Toutefois, ce cas d'école ne peut pas être transposé à toutes les filières, et notamment pas aux bovins à viande pour lesquels on observe une variabilité intra-race (entre animaux) de la qualité de la viande supérieure aux

différences éventuelles entre races (Picard *et al.*, 2007). Le second niveau d'approche est de tirer profit de la variabilité génétique intra-race ou souche pour améliorer la qualité par sélection. Différents critères de qualité ont été étudiés en fonction des filières avec des niveaux d'héritabilité, estimée en populations commerciales ou expérimentales, souvent compatibles avec la mise en place d'une sélection (Renand *et al.*, 2003). Les possibilités de sélection de la qualité dépendent largement de l'accès à des mesures rapides et donc automatisables et si possible non destructives pour éviter, autant que possible, une évaluation lourde et coûteuse sur collatéraux abattus. Si l'utilisation des informations moléculaires dans le cadre d'approches globale comme la sélection génomique ou ciblée sur des gènes majeurs permet en partie de se passer à terme de la mesure des phénotypes, les étapes préalables de mise au point des index génomiques ou d'identification et de validation des mutations causales impliquent toujours un phénotypage à large échelle. Notons que, parmi les quelques polymorphismes aujourd'hui disponibles pour la sélection animale, plusieurs concernent des paramètres de qualité des produits carnés : gène de sensibilité à l'halothane (Fujii *et al.*, 1991) responsable des défauts de viande PSE (Pale, Soft, Exsudative) et gène RN (Rendement Napole) responsable des défauts de viande acide chez le Porc (Milan *et al.*, 2000), gène de la myostatine ou gène culard pour le poids et la conformation des carcasses avec des conséquences sur la qualité de la viande (Allais *et al.*, 2010), gène *BCMO1* (β -carotène-

15,15'- monoxygénase) responsable de la variation de coloration jaune et de la teneur en caroténoïdes (lutéine et zéaxanthine) dans la viande de poulet (Le Bihan-Duval *et al.*, 2011). Le phénotypage fin de la qualité (y compris par les approches haut-débit de type transcriptomique ou métabolomique) couplé à un génotypage haut-débit devrait accélérer l'identification d'autres polymorphismes permettant de diminuer la fréquence des défauts de qualité ou de sélectionner des aptitudes favorables au sein des lignées ou des populations (Hocquette *et al.*, 2012).

Si la qualité du produit s'élabore en fonction de bases biologiques propres à l'animal, l'abattage ainsi que les procédés de conservation ou de transformation ont aussi un impact majeur. Ainsi, des liens entre qualité de la viande et stress à l'abattage ont été confirmés, montrant l'importance d'adapter les conditions d'abattage en fonction des espèces (ou souches) et des modes de production pour améliorer la qualité du produit tout en respectant le bien-être animal (Terlouw *et al.*, 2012). Pour cela, il est nécessaire d'évaluer conjointement sur des effectifs suffisamment larges les relations entre réponses au stress et qualité des produits. La maîtrise des procédés de fabrication par l'homme et son appropriation par les filières n'est pas non plus encore résolue. Ainsi, les recherches se poursuivent pour limiter les processus d'oxydation des lipides et des protéines afin de préserver les qualités nutritionnelle et sensorielle des produits en optimisant notamment les barèmes de cuisson (Durand *et al.*, 2012).

Les enjeux de connaissance pour la qualité des produits sont donc une meilleure compréhension :

- **Des bases biologiques de l'élaboration de la qualité des viandes au travers de l'étude des facteurs d'élevage (en particulier l'alimentation) et génétiques,**
- **De l'influence des facteurs d'aval (abattage, conservation, transformation, cuisson) sur la qualité des produits en interaction avec les caractéristiques animales,**
- **Des interactions entre les précédents facteurs (à l'aide notamment de méta-analyses) pour une élaboration optimale de la qualité depuis la production jusqu'à la consommation.**

III. MESURES ET VERROUS DE CONNAISSANCE TECHNIQUE POUR LE PHENOTYPAGE

Les garanties d'hygiène et de sécurité étant le premier critère de choix des consommateurs, il importe de réduire les risques de contaminations chimiques (résidus de médicaments ou de désinfectants, mycotoxines, etc.) et biologiques. Tel est en particulier le cas des principales bactéries pathogènes identifiées dans les viandes et produits carnés : *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli* producteurs de shigatoxines (STEC), *Campylobacter* spp., *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens*, *Yersinia enterocolitica*, *Bacillus cereus*, dont la prévalence va dépendre des produits (EFSA, 2011 ; Feurer *et al.*, 2013). Les pathogènes sont soumis à des normes réglementaires européennes (directives du « paquet hygiène » 2073/2005 modifié). Suivant la bactérie pathogène et l'aliment concerné, la norme exige l'absence dans le produit, ou tolère un faible niveau de population. A titre d'exemple, pour *Salmonella*, le critère est « absence dans 25 g » pour les produits mis sur le marché pendant leur durée de conservation. Sur la base de ces considérations, le principal verrou technique est de développer en priorité des méthodes rapides de détection et ou de quantification des pathogènes (et plus largement des substances toxiques) pour pouvoir à la fois garantir la qualité des produits et refuser les lots non conformes avant leur

entrée dans la chaîne alimentaire. De nombreux outils moléculaires ont été développés pour les pathogènes dont la majorité est basé sur la PCR et la PCR quantitative. Dans tous les cas, il faut extraire l'ADN d'un aliment avant de réaliser l'étape de la PCR et de nombreuses études ont été consacrées ces dernières années à ce volet. La recherche de ces bactéries pathogènes doit passer par des méthodes ciblées (PCR spécifique d'espèces, de sérotypes voire de facteurs de virulence) car elles contaminent l'aliment dans la majorité des cas à des taux très faibles et font souvent partie des populations sous dominantes qu'il est encore difficile de mettre en évidence par des approches globales de métagénomique. Les méthodes de mesure des contaminants biologiques ou chimiques sont en constant renouvellement et amélioration du fait à la fois des progrès techniques mais aussi de l'émergence de nouveaux risques. Ainsi, des chercheurs de l'INRA ont montré l'intérêt de la signature en métabolites volatils des produits carnés pour tracer l'exposition des animaux à des micropolluants au cours de l'élevage. Cette approche est surtout intéressante pour les micropolluants rapidement métabolisés par l'organisme de l'animal, et donc indétectables dans les produits carnés (Ratel et Engel, 2012). La standardisation et les modes d'application des méthodes de mesure sont des verrous

importants à lever du fait de l'impact sur la fiabilité et le temps de mesure mais aussi des conséquences économiques importantes (Jez *et al.*, 2010). Si le contrôle de la qualité sanitaire de l'aliment est un élément crucial pour la sécurité de la chaîne alimentaire, la maîtrise en amont des contaminations est un autre verrou technologique qui fait partie intégrante de la stratégie de prévention. Les travaux sur le portage animal (dans le cas de bactéries pathogènes pour l'homme comme *Salmonella*, *Cambylobacter*, STEC) restent donc un volet de recherche important qui nécessite lui aussi une standardisation des tests (choix de la souche étudiée, cinétique de contamination, etc.) (Velge *et al.*, 2008).

Concernant les caractéristiques sensorielles, la méthode de choix reste la dégustation par un jury entraîné sur la base de tests discriminatifs pour repérer des différences entre deux ou plusieurs produits ou descriptifs pour évaluer le « profil sensoriel » du produit à partir d'une liste des descripteurs prédéfinis. Ces tests sont aujourd'hui très largement utilisés en agroalimentaire pour mettre en relation les caractéristiques du produit et son appréciation par le consommateur. Les tests consommateurs avec des personnes non entraînés permettent quant à eux de se rapprocher le plus possible du comportement réel du consommateur. Cependant, quel que soit leur type, les tests sensoriels sont difficilement applicables sur un grand nombre d'échantillons et présentent des limites technologiques et statistiques liés à la variabilité technique de la mesure. Une amélioration des techniques de référence d'appréciation des caractéristiques sensorielles avec des consommateurs (protocoles standards, maîtrise de la variabilité des réponses, etc.) est donc à rechercher comme cela a été fait en Australie pour la viande bovine (Watson *et al.*, 2008). Toutefois, en raison de leur lourdeur et de leur coût élevé, ces recherches doivent être accompagnées du développement de mesures prédictives de la qualité sensorielle. La perception sensorielle et l'acceptabilité d'un produit résultant d'interactions complexes entre plusieurs composants (de goût, texture, odeur, couleur...), il existe aussi un besoin d'approches intégrées afin de mieux les évaluer en termes d'impact sur le comportement alimentaire.

Les qualités nutritionnelle, technologique et sensorielle dépendent largement des caractéristiques physico-chimiques du produit, mesurées grâce à de nombreuses techniques analytiques de laboratoire. Ainsi, les méthodes chimiques permettent d'évaluer la composition globale du produit en eau, lipides, protéines, et cendres, ainsi que la composition fine en acides gras, acides aminés, sucres, pigments, minéraux, cholestérol, la quantité et solubilité du collagène (dans le cas de la viande), ou le niveau d'oxydation des lipides ou des protéines, etc. D'autres méthodes, physiques ou mécaniques, ont été développées pour mesurer l'acidité du produit (pH), l'activité de l'eau (paramètre a_w), la couleur, la tendreté (mesure de résistance au cisaillement ou à la compression), le pouvoir de rétention en eau (tests de gravimétrie, de compression, de centrifugation ou de cuisson), les rendements de transformation, etc. Ces mesures ont largement été améliorées et standardisées pour accroître leur précision et servent aujourd'hui de références en la matière (voir par exemple Petracci et Baeza, 2011, et Hocquette *et al.*, 2007). Par contre, pour la plupart, en raison notamment d'une absence de maîtrise technique par les acteurs professionnels, elles sont difficilement applicables à large échelle, en particulier dans des conditions industrielles où manipulations et temps de mesure doivent être réduits.

Il existe donc un besoin de méthodes alternatives à haut débit et non destructives pour prédire la composition et les propriétés technologiques et fonctionnelles des produits. Des projets de recherche et développement explorent déjà l'intérêt de nouvelles technologies optiques, par imagerie ou physiques. Ainsi le programme PhénoFinlait a permis le développement d'équations de prédiction de la composition fine du lait (Leray *et al.*, 2011). De même, la spectrométrie en proche infrarouge (NIRS) permet de prédire la teneur en lipides du filet de poulet (Chartrin *et al.*, 2010) et de canard (Bastianelli *et al.*, 2009), avec une précision augmentée lorsque la mesure est faite sur un broyat de muscle qui est alors homogénéisé. De nombreux produits alimentaires présentent en effet des distributions hétérogènes pour des constituants majeurs (lipides, protéines ou collagène), ce qui rend difficile l'accès à des échantillons représentatifs avec des approches non destructives du produit, et limite la précision des prédictions par ce type de méthode. Chez le porc, c'est l'IRM qui est aujourd'hui envisagée pour quantifier la teneur et la répartition (persillé) du gras sur morceaux entiers (de type côtelette). L'utilisation de la spectrométrie visible et proche infrarouge est étudiée dans cette même espèce pour la prédiction des rendements technologiques, de tranchage et de transformation des muscles de la longe et du jambon (Vautier *et al.*, 2011). D'autres approches sont en cours d'étude comme l'utilisation des ultra-sons pour estimer la teneur en lipides de la viande (Maignel *et al.*, 2013).

Pour de nombreux produits (y compris les viandes), le produit consommé est de plus en plus élaboré ce qui implique comme nous l'avons vu de nombreuses étapes de transformation (découpe, cuisson, conservation), si l'on veut aller jusqu'à l'évaluation de la qualité du produit final. Ceci montre la nécessité de rechercher des indicateurs précoces de la qualité qui permettraient, par exemple, de prédire le rendement technologique ou la qualité sensorielle à partir d'un échantillon prélevé en amont idéalement sur l'animal. Cela permettrait notamment de prédire le potentiel d'un animal à produire une viande de qualité, et d'orienter cet animal vers le système de production le plus adapté afin qu'il puisse pleinement exprimer son potentiel. Outre les caractéristiques physico-chimiques et structurales du produit, les études s'orientent vers la recherche de biomarqueurs tels les transcrits ou les protéines dans les muscles ou encore les métabolites circulants dans le sang (pour des raisons d'accessibilité facilitée) dont la quantité est un bon prédicteur de la mesure d'un caractère d'intérêt difficilement mesurable (Lagarigue et Tixier-Boichard, 2011). Jusqu'à présent, les programmes de génomique fonctionnelle ont permis d'établir des listes de biomarqueurs associés à la variabilité de différents critères de qualité. Pour toutes les espèces, il apparaît que les caractéristiques des viandes reposent sur des processus biologiques complexes qui impliquent un grand nombre de bio-marqueurs qui doivent être analysés ensemble pour appréhender l'ensemble des mécanismes biologiques et leurs interactions. La stratégie est aujourd'hui d'élaborer des outils permettant de quantifier à moindre coût et simultanément ces marqueurs au niveau des transcrits ou des protéines sur un grand nombre d'échantillons (Picard *et al.*, 2012). L'identification des marqueurs génétiques (principalement de type SNP) associés à des critères de qualité est également une approche très prometteuse car elle permettrait un diagnostic à la fois précoce et non invasif sur l'animal et une utilisation facile en sélection génétique.

Les verrous techniques pour le phénotypage de la qualité des produits sont donc :

- Le développement et la standardisation de méthodes rapides de détection et de quantification des contaminants biologiques ou chimiques,
- La recherche d'alternatives aux mesures analytiques de la composition et des propriétés techno-fonctionnelles des produits grâce à des technologies innovantes utilisables en routine (méthodes optiques ou par imagerie, méthodes physiques non invasives, etc.),
- La recherche et la validation de marqueurs biologiques précoces de la qualité et le développement de méthodes utilisables en routine pour les mesurer, et la recherche de marqueurs génétiques.

IV. PERSPECTIVES ET LIMITES A L'AMELIORATION DU PHENOTYPE

Au-delà des attentes du consommateur, les choix en termes de qualité des produits s'élaborent au niveau des filières en fonction des possibilités de valorisation économique du produit et des meilleurs compromis technico-économiques. L'accès à un large phénotypage de la qualité pourra contribuer à identifier de nouvelles voies de valorisation des produits animaux et à promouvoir les systèmes d'élevage dans leur diversité. Les développements importants des méthodes spectrales montrent qu'il est possible de trouver des technologies plus rapides, faciles d'utilisation et non destructives de prédiction de la qualité avec de larges applications pour les productions animales à l'instar des productions végétales. Les outils d'analyse à haut-débit de la biologie des animaux grâce au transcriptome (niveau des transcrits), au protéome (niveau des protéines) ou au métabolome (niveau des métabolites) rendent aussi possible l'identification de marqueurs biologiques de la qualité accessibles sur l'animal, avec des champs d'application très larges en sélection et en élevage. Néanmoins, l'utilisation des nouvelles mesures prédictives ou des bio-marqueurs ne sera possible qu'une fois leur lien établi avec les propriétés nutritionnelles, technologiques, fonctionnelles ou encore organoleptiques du produit. L'enjeu de ces modèles est de permettre un phénotypage

précoce, à moindre coût et à plus ou moins grande échelle de telle sorte que, dès l'élevage, tout puisse être mis en œuvre (sélection, gestion du troupeau, alimentation...) pour élaborer le produit le plus adapté à sa valorisation finale auprès des consommateurs, et en parallèle optimiser les procédés de transformation et la valorisation du produit en fonction de ses qualités intrinsèques.

Sur la base de ces perspectives, il est donc conseillé aux acteurs de la recherche et du monde professionnel de faire évoluer leurs outils d'investigation en s'appropriant au mieux les nouvelles technologies de phénotypage fin ou à haut débit qui se développent. En raison de leur coût et de la nécessaire expertise pour mettre en œuvre ces technologies, et aussi pour des soucis de standardisation de méthode et de partage des données, la mise en place de plateformes ou d'infrastructures de recherche est la voie qui est privilégiée par la communauté européenne. Comme pour la génomique, ce nouveau modèle d'organisation permet d'aller vers des outils collectifs de haute technicité. En parallèle, la mesure des performances des animaux avec des méthodes standardisées et la collecte des données au niveau des élevages et des sites de transformation (abattoirs, etc.) est également nécessaire pour une recherche de qualité et utile pour les professionnels.

Bibliographie

- Alim'agri, 2011. La consommation alimentaire (http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Chiffres2011_32-33.pdf) [cited 29/06/2013].
- Allais S., Levéziel H., Payet-Duprat N., Hocquette J.F., Lepetit J., Rousset S., Denoyelle C., Bernard-Capel C., Journaux L., Bonnot A., Renand G., 2010. The two mutations, Q204X and nt821, of the myostatin gene affect carcass and meat quality in young heterozygous bulls of French beef breeds. *J. Anim. Sci.*, 88(2), 446-454.
- Bastianelli D., Bonnal L., Chartrin P., Bernadet M.D., Marie-Etancelin C., Baeza E., 2009. Near-infrared reflectance spectroscopy for predicting lipid content in duck breast meat. XIX WPSA European Symposium on the Quality of Poultry Meat, Turku (Finland), 21-25/06/09, 1-9.
- Beef Improvement Federation (BIF), 2010. Guidelines For Uniform Beef Improvement Programs. Ninth Edition. <http://www.beefimprovement.org/PDFs/guidelines/Guidelines-9th-Edition.pdf>. [cited 29/06/2013].
- Bourre J.M., 2005. Enrichissement de l'alimentation des animaux avec les acides gras ω -3. *Medecine/Sciences*, 21, 773-779.
- Chartrin P., Rousseau X., Gigaud V., Bastianelli D., Baeza E., 2010. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Predicting Lipid Content in Chicken Breast Meat. 13th WPSA European Poultry Conference, Tours (France), 23-27/08/10, 4p.
- Dockès A.C., Magdelaine P., Daridan D., Guillaumin A., Rémondet M., Selmi A., Gilbert H., Mignon-Grasteau S., Phocas F., 2011. Attentes en matière d'élevage des acteurs de la sélection animale, des filières de l'agroalimentaire et des associations. *INRA Prod. Anim.*, 24(4), 285-296.
- Durand D., Gobert M., Gatellier P., 2012. Oxydation des lipides et des protéines des viandes au cours des processus de transformation: mécanismes, conséquences et prévention. 14^{èmes} Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes, 13 et 14 Novembre 2012, Caen, 9-16.
- European Food Safety Authority, European Centre for Disease Prevention and Control; The European Union Summary Report on Trends and Sources of Zoonoses, Zoonotic Agents and Food-borne Outbreaks in 2009; *EFSA Journal* 2011; 9(3):2090. [378pp.]
- Feurer C., Christieans S., Rivollier M., Leroy S., Talon R., Champomier-Vergès M., Zagorec M., Desmonts M.H. 2013. Applications de la biopréservation via des cultures microbiennes dans la filière des produits carnés. In *Flores protectrices pour la conservation des aliments*. Editions Quae, ISBN: 978-2-7592-1920-9, ISSN: 1777-4624. Chapitre 4, pp 69-85.
- Fujii 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.

- Hanne H., Roux N., 2012. Evolution des dépenses et des prix d'alimentation dans la consommation des ménages en France et en Europe depuis 1959. Dgccrf éco, N°4 Mai 2012 (http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/dgccrf/documentation/dgccrf_eco/dgccrf_eco4.pdf). [cited 29/06/2013].
- Herpin P. 2009. Quelles perspectives de recherche en productions animales. Cahiers Agricultures 18, 5–6.
- Hocquette J.F., Renand G., Dufour E., Lepetit J., Nute G.R., 2007. Traditional and new methods to assess meat quality. In "Evaluation of carcass and meat quality in cattle and sheep", C Lazzaroni, S. Gigli and D Gabiña (editors), EAAP Publication 123, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp.61-80.
- Hocquette J.F., Capel C., David V., Guéméné D., Bidanel J., Barbezant M., Gastinel P.L., Le Bail P.Y., Monget P., Mormède P., Peyraud J.L., Ponsart C., Guillou F, 2011. Les objectifs et les applications d'un réseau organisé de phénotypage pour les animaux d'élevage. Rencontres Recherches Ruminants, 18, 327-334
- Hocquette J.F., Capel C., David V., Guéméné D., Bidanel J., Ponsart C., Gastinel P.L., Le Bail P.Y., Monget P., Mormède P., Barbezant M., Guillou F, Peyraud J.L., 2012. Objectives and applications of phenotyping network set-up for livestock. Animal Science Journal 83, 517–528.
- Hocquette J.F., Jacquet A., Giraud G., Legrand I., Sans P., Mainsant P., Verbeke W., 2013. Quality of food products and consumer attitudes in France. In: « Consumer attitudes to food quality products », Klopčič M., Kuipers A., Hocquette J.F. (Editors), 2013. EAAP Publication 133, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, p. 67-82.
- Hurtaud C., Bugeon J., Dameron O., Fatet A., Hue I., Meunier-Salaün M.C., Reichstadt M., Valancogne A., Vernet J., Reecy J., Park C., Le Bail P.Y. 2011. ATOL: a new ontology for livestock. General Assembly and annual workshop of ICAR 2011. Bourg-en-Bresse, France, 22–24 June 2011. [cited 29 June 2013]. Available from [URL:http://www.icar.org/Documents/Bourg-en-Bresse2011/Presentations/session%20%20-%2022%20pm/S2b-%20C%20Hurtaud.pdf](http://www.icar.org/Documents/Bourg-en-Bresse2011/Presentations/session%20%20-%2022%20pm/S2b-%20C%20Hurtaud.pdf)
- Jez C., Beaumont C., Magdelaine P., 2010. La filière avicole française à l'horizon 2025. Une prospective INRA-ITAVI. INRA Prod. Anim., 23 (5), 379-390.
- International Committee for Animal Recording (ICAR), 2012. International agreement of recording practices. Guidelines approved by the General Assembly held in Cork, Ireland on June 2012. http://www.icar.org/Documents/Rules%20and%20regulations/Guidelines/Guidelines_2012.pdf. [cited 29 June 2013].
- Lagarigue S., Tixier-Boichard M., 2011. Nouvelles approches de phénotypage pour la sélection animale. INRA Productions Animales, 24 (4), 377-386.
- Le Bihan-Duval E., Nadaf J., Berri C., Pitel F., Graulet B., Godet E., Leroux S.Y., Demeure O., Lagarrigue S., Duby C., Cogburn L., Beaumont C., Duclos M.J., 2011. Detection of a Cis eQTL controlling BCMO1 gene expression leads to the identification of a QTG for chicken breast meat color. Plos One, 6 (7), 10 p. (e14825).
- Leray O., Ferrand M., Larroque H., Astruc J.M., Douguet M., Brochard M., Duhem K., 2011. Harmonisation of milk analysers for fatty acid determination by FTMIR - An essential step prior to collective data use. General Assembly and annual workshop of ICAR 2011. Bourg-en-Bresse, France, 22–24 June 2011. <http://www.icar.org/Documents/Bourg-en-Bresse2011/Presentations/session%204%20-%2023%20am/2%20Olivier%20Leray.pdf>. [cited 29 June 2013].
- Luning, P. A., Marcelis, W. J., & Jongen, W. M. F. (2002). Food quality management. A technico-managerial approach. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Pers.
- Maignel, L., Daigle, J.P., Fortier, M.P., Wyss, S., Sullivan, B., 2013. Prédiction de la teneur en gras intramusculaire dans le jambon de porcs vivants par la technologie aux ultrasons et relation avec le gras intramusculaire dans la longe, 45^{èmes} Journées de la Recherche Porcine, Paris 5 et 6 février 2013, Poster - G 06, pages 247-248.
- Milan D., Jeon J.T., Looft C., Amarger V., Robic A., Thelander M., Rogel-Gaillard C., Paul S., Ianucelli N., Rask L., Ronne H., Lundström K., Reinsch N., Gellin J., Kalm E., Le Roy P., Chardon P., Andersson L., 2000. A mutation in PRKAG3 associated with excess glycogen content in pig skeletal muscle. Science, (288), 1248-1251.
- Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2012. Linéaires N°276 janvier 2012-Supplément Innovation (http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PANORAMA-IAA-010-R_D_cle0b62d2.pdf).
- Petracci M., Baeza E., 2011. Harmonization of methodologies for the assessment of poultry meat quality features. World's Poultry Science Journal, 67, 137-151.
- Picard B., Jurie C., Bauchart D., Dransfield E., Ouali A., Martin J.F., Jailler R., Lepetit J., Culioli J., 2007. Caractéristiques des muscles et de la viande des principales races bovines allaitantes du Massif central. Sci. Alim., 27 (2), 168-180.
- Picard, B., Berri, C., Lebret, B., Lefèvre, F., Damon, M., Liaubet, L., Cassar-Malek, I., Hocquette, J.F., Renand, G., 2012. Génomique et viande : Quelles avancées, quelles applications ? 14^{èmes} Journées des Sciences du Muscle et Technologies de la viande. 13-14 novembre 2012, Caen.
- Ratel, J., Engel, E. 2012. Back-tracing poultry meat chain exposure to rapidly metabolized pollutants using volatile compound metabolic signatures in liver tissues. The Column. 8, 2-10.
- Renand G., Larzul C., Le Bihan-Duval E., Le Roy P., 2003. L'amélioration génétique de la qualité de la viande dans les différentes espèces : situation actuelle et perspectives à court et moyen terme. INRA Prod. Anim., 16 (3), 159-173.
- Sauveur B., 1997. Les critères et facteurs de la qualité des poulets Label Rouge. INRA Prod. Anim., 10 (3), 219-226.
- Terlouw E.M.C., Bourguet C., Cassar-Malek I., Deiss V., Lebret B., Lefevre F., Picard B., 2012. Stress à l'abattage et qualités des viandes : les liens se confirment. 14^{èmes} Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes, 13 et 14 Novembre 2012, Caen, 135-142.
- Vautier A., Gault E., Lhommeau T., 2011. Aptitude technologique de la longe pour une transformation en salaison : identification des principaux prédicteurs du rendement technologique et tranchage ». Rapport Ifip - Institut du porc, Novembre 2011, 23 pages.
- Velge P., Virlogeux-Payant I., Lalmanach A.C., Belloc C., Fravallo P., Vignal A., Beaumont C., 2008. Réduction du portage des salmonelles chez les animaux de rente : une approche multidisciplinaire. INRA Prod. Anim., 21(1), 117-126.
- Watson, R., Gee, A., Polkinghorne, R., & Porter, M. (2008). Consumer assessment of eating quality - Development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. Australian Journal of Experimental Agriculture, 48, 1360–1367.