

# Utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge et de la spectroscopie de fluorescence pour estimer la qualité et la traçabilité de la viande

D. ANDUEZA<sup>1,2</sup>, B.-P. MOUROT<sup>1,2,3</sup>, A. AÏT-KADDOUR<sup>4</sup>, S. PRACHE<sup>1,2</sup>, J. MOUROT<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champagnelle, France

<sup>2</sup> Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>3</sup> Valorex, La Messayais, F-35210 Combourtille, France

<sup>4</sup> Clermont Université, VetAgro Sup, UR2011.03.100 CALITYSS, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>5</sup> INRA, UMR 1348 PEGASE, F-35590 St-Gilles

<sup>6</sup> Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, F-35000 Rennes

Courriel : donato.andueza@clermont.inra.fr

La spectroscopie dans le proche infrarouge et la spectroscopie de fluorescence sont des techniques d'analyse rapides et très prometteuses pour la filière viande. Elles permettent d'estimer différentes caractéristiques de la qualité des viandes comme la composition chimique globale et nutritionnelle, certaines caractéristiques technologiques et sensorielles. Elles peuvent aussi être utilisées pour la traçabilité de la viande afin de détecter des fraudes éventuelles.

La consommation de viande en France est importante : environ 87 kg équivalent carcasse/habitant/an à laquelle la filière répond en proposant un large choix de produits. Face à cette multitude d'offres, les consommateurs sont de plus en plus intéressés par la qualité des produits et demandent la mise en place de systèmes de qualité garantissant les produits achetés (Lebret et Picard 2015, ce numéro). Pendant les 50 dernières années, un effort considérable a été réalisé sur la sécurité des produits alimentaires et plus particulièrement de la viande, dans les domaines des processus de production et des relations entre la qualité et la production de la viande. Plus récemment, des méthodes d'analyse ont été mises en place pour mesurer différentes caractéristiques de la qualité de la viande. Ces méthodes, en général invasives et/ou destructives limitent leur utilisation au niveau de la chaîne de production. A ce jour, un des enjeux de l'industrie agro-alimentaire est d'obtenir une information fiable sur la qualité de la viande tout au long du processus de production de manière à assurer la qualité finale du produit. Ce défi requière des outils de détection rapides, précis et non destructifs, capables d'être installés au niveau de la chaîne de production, et adaptés à un environnement difficile. Ces outils doivent permettre une évaluation continue de chaque étape des procédés. Les techniques qui répondent

à ces conditions et qui pourraient être utilisées pour l'analyse rapide de la qualité de la viande ont été présentées dans la revue de Damez et Clerjon (2013). Les méthodes les plus prometteuses sont basées principalement sur l'utilisation des ondes du spectre électromagnétique telles que la Spectroscopie dans le Proche InfraRouge (SPIR) et la Spectroscopie de Fluorescence (SF). Pour cette synthèse, nous nous limiterons à ces deux techniques et à leurs applications pour l'évaluation de la qualité de la viande.

## 1 / La spectroscopie dans le proche infrarouge : principe et instrumentation

### 1.1 / Principe général

La spectroscopie peut être définie comme l'étude de l'interaction de la lumière avec la matière. Le rayonnement dans le Proche InfraRouge (PIR) couvre la plage des longueurs d'onde de la lumière comprise entre 780 et 2 500 nm. La spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) a été découverte par F.W. Herschel en 1 800. Les principes de la SPIR sont très bien décrits dans la synthèse de Bertrand (2002) (encadré 1).

La SPIR a été d'abord appliquée à des produits agricoles par Norris et Hart (1965) pour mesurer l'humidité des graines de céréales. Depuis, elle a été utilisée pour obtenir des analyses rapides dans un grand nombre de produits y compris les produits carnés. Les premières applications sur ces produits étaient la mesure de la composition chimique (Ben-Gera et Norris 1968), puis elle a été utilisée pour d'autres déterminations comme la teneur en minéraux, en collagène, ainsi que pour estimer les propriétés sensorielles (Ripoll *et al* 2008). Des développements récents incluent l'utilisation de la spectroscopie multi et hyper-spectrale qui fournit une information à la fois spectrale et spatiale de la composition du produit (Martinsen et Schaare 1998).

L'importance croissante de la SPIR pour la réalisation des mesures de la qualité de la viande est évidente au vu du nombre de travaux publiés ainsi que du nombre d'industriels équipés d'appareils SPIR ces dernières années.

### 1.2 / Equipement

La saisie de spectres dans le PIR se fait à l'aide d'un spectromètre. Le principe de fonctionnement, l'appareillage et les différents types d'appareils ont été

décrits précisément par Bertrand (2002). La plage du spectre électromagnétique couvert, la taille de la fenêtre de l'appareil en contact avec l'échantillon ainsi que la robustesse de l'appareil et son adaptation aux environnements peu contrôlés et agressifs pouvant être rencontrés en industrie sont des critères qui peuvent jouer sur les résultats des étalonnages. Tous ces paramètres sont à prendre en compte lors du choix d'un appareil. Par ailleurs, une des différences entre les instruments est la plage du spectre électromagnétique couvert. Certains instruments sont capables d'obtenir une information entre 400 et 2 500 nm tandis que d'autres balayent seulement la plage entre 900 et 1 700 nm ou entre 700 et 1 050 nm, voire entre 350 et 999 nm. Cette information peut s'avérer importante pour obtenir des modèles précis d'étalonnage et donc pour effectuer le choix d'un appareil.

## 2 / La spectroscopie de fluorescence

### 2.1 / Principe : le phénomène de fluorescence

Certaines molécules excitées suite à l'absorption de photons à une longueur d'onde donnée vont revenir à leur état fondamental en émettant des photons de longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde d'excitation : c'est le principe de la fluorescence (voir encadré 2).

### 2.2 / Les molécules fluorescentes

Les molécules fluorescentes constituent la base de la SF et représentent l'élément clé de cette méthode. Les fluorophores sont couramment divisés en deux catégories selon leur origine : extrinsèque ou intrinsèque (Lakowicz 1999). Les fluorophores intrinsèques sont des molécules

naturellement présentes dans les produits (Lakowicz 1999, Dufour *et al* 2001) et les fluorophores extrinsèques sont des molécules ajoutées à un échantillon contenant une molécule d'intérêt non fluorescente (Herbert 1999, Lakowicz 1999). Cette revue bibliographique se limite aux applications impliquant uniquement les fluorophores naturellement présent dans la viande.

### 2.3 / Les modes d'acquisition des spectres de fluorescence

Il existe deux modes d'acquisition des spectres de fluorescence pour évaluer la qualité de la viande : le mode par excitation frontal et le mode par excitation synchrone.

#### a) La fluorescence frontale

Dans le cas où l'absorbance d'un échantillon est supérieure à 0,1 (unités arbitraires), un effet d'écran se produit induisant

#### Encadré 1. Principe détaillé de la SPIR.

La spectroscopie infrarouge est basée sur l'existence de liens directs entre les caractéristiques physiques et chimiques d'un produit avec son absorbance à des longueurs spécifiques du segment proche infrarouge (PIR). Dans le spectre électromagnétique, ce segment (780-2500 nm) est situé entre celui du visible (400-780 nm) et celui de l'infrarouge (2 500-25 000 nm). Brièvement, l'absorption de lumière par un produit est due au changement d'état vibrationnel des liaisons chimiques des molécules organiques quand ce produit est irradié par la radiation PIR et quand la fréquence de vibration des liaisons et celle de la radiation coïncident. La contribution relative de la radiation absorbée dépend de la composition chimique et des propriétés physiques de l'échantillon lorsque le rayonnement pénètre dans le produit, ses caractéristiques spectrales peuvent changer par diffusion, laquelle dépend de la longueur d'onde et de l'absorption. Ce changement dépend des propriétés de diffusion de la lumière qui sont en relation avec la microstructure du produit (figure 1). Des techniques de statistiques multivariées telles que l'analyse en composantes principales sont ensuite appliquées afin de séparer et extraire l'information souhaitée de l'ensemble de l'information présente dans le spectre PIR.

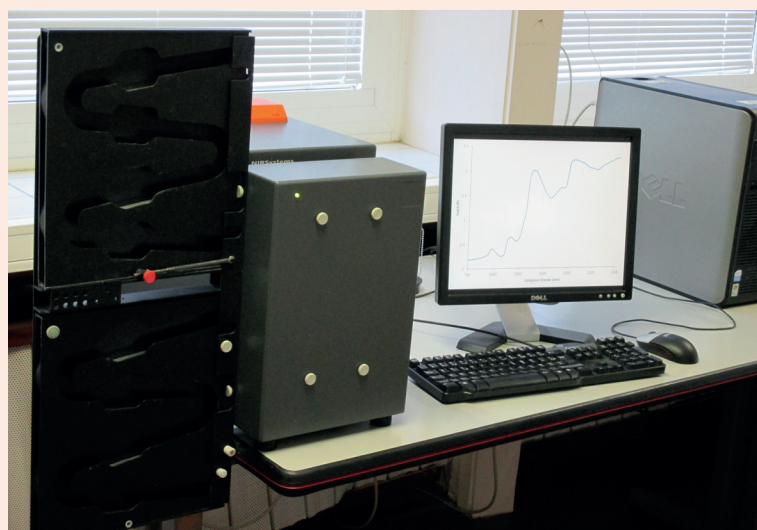


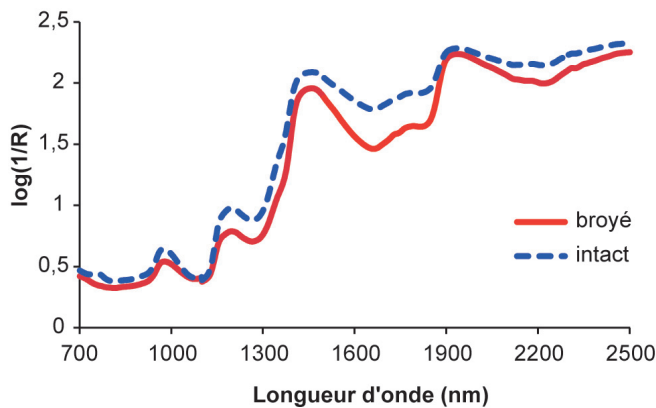
Photo 1. Un spectromètre dans le proche infra-rouge avec le passeur d'échantillons

La réflexion de la lumière provient de trois phénomènes différents : la réflexion spéculaire, qui provoque la brillance, la réflexion externe qui diffuse la lumière à cause de la rugosité des surfaces et la dispersion, qui est le résultat des réfractions multiples internes dans le matériel étudié. Les deux premiers éléments donnent des informations sur la surface des échantillons, tandis que le dernier apporte des informations internes à l'échantillon. Dans la viande, les myofibrilles peuvent être des éléments très dispersants de la lumière (Prieto *et al* 2009), mais la dispersion dépend aussi de la taille (Meurens 2000) et de la microstructure des particules (Barnes *et al* 1989) de la viande. Ainsi, les valeurs d'absorption sont plus élevées sur des échantillons intacts que finement broyés (figure 1). Le processus de dispersion influence le niveau d'intensité du spectre.

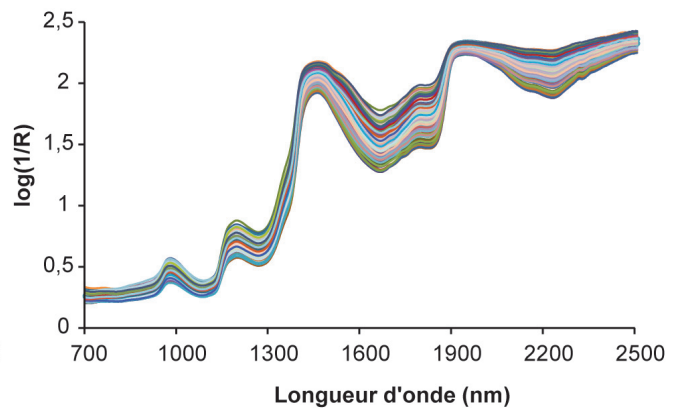
Les bandes d'absorption dans la région du PIR, sont des harmoniques des fréquences de vibration des molécules ou des combinaisons des vibrations fondamentales (bandes de combinaison) de la région

du moyen infrarouge du spectre électromagnétique qui fait partie du domaine de la spectroscopie vibrationnelle. Le spectre PIR est caractérisé par la présence de larges bandes à la place de pics étroits. La figure 2 représente le spectre de 255 échantillons de viande bovine. Les spectres sont caractérisés par la présence des harmoniques et des bandes de combinaison de l'eau aux longueurs d'onde de 970, 1190, 1450 et 1940 nm, des protéines (1520, 1600, 2050 et 2180 nm) et des matières grasses (1200, 1730, 1760, 2140, 2300 et 2348 nm) (Osborne et Fearn 1988, Bertrand 2002).

**Figure 1.** Spectre d'un échantillon de viande ovine intact et broyé (Guy et al 2011).



**Figure 2.** Spectres proche infrarouge d'une population de 255 muscles de l'espèce bovine (Mourot et al 2015).



**Encadré 2.** Principe détaillé de la spectroscopie de fluorescence.

Lorsqu'un photon rencontre une molécule, les électrons de cette molécule absorbent cette énergie et passent d'un niveau fondamental  $S_0$  à un niveau d'énergie supérieure  $S_x$  ( $x = 1, 2, \dots$ ) ; la molécule est dite excitée. L'état excité persiste pendant un temps caractéristique de chaque molécule. Suite à des collisions avec d'autres molécules, une désactivation a lieu et l'électron revient vers le plus bas niveau vibrationnel de l'état excité. Ce phénomène est appelé *conversion interne* et se produit en un temps très court (de l'ordre de  $10^{-12}$  s). Si la molécule possède suffisamment d'énergie l'électron retourne au niveau  $S_0$  en émettant un photon. Cette émission de photons est appelée fluorescence. Le signal enregistré à différentes longueurs d'onde constitue le spectre d'émission de fluorescence. Le spectre d'excitation de fluorescence, quant à lui, rend compte des énergies et du nombre de photons absorbés par les seuls électrons qui réémettront l'énergie lumineuse sous forme de photons de fluorescence à une longueur d'onde donnée. Ce spectre est donc proche, mais pas identique, au spectre d'absorption de la molécule fluorescente.

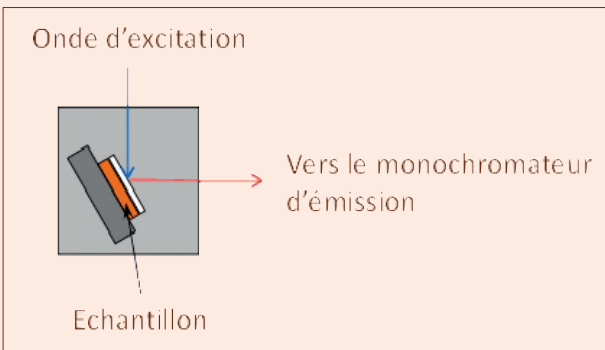
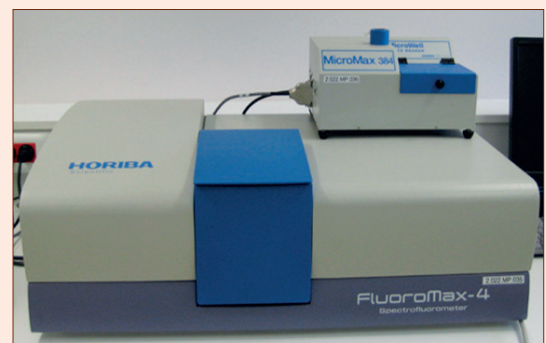


Schéma d'une cellule de mesure de fluorescence en mode frontal pour échantillon solide.

Les *fluorophores intrinsèques* sont des molécules naturellement présentes dans les produits, et qui possèdent la propriété de fluorescence. Ces molécules sont le plus souvent des acides aminés aromatiques (ex. tryptophane), les purines, les pyrimidines, les flavines, la chlorophylle, certains cofacteurs enzymatiques (ex. NADH), la riboflavine ainsi qu'un grand nombre de vitamines comme les vitamines A et E.

Les *fluorophores extrinsèques* sont des molécules ajoutées à un échantillon contenant une molécule d'intérêt non fluorescente. Ces fluorophores peuvent être de nature hydrophile (solubles en milieu aqueux), hydrophobe (lipides : acides gras, phospholipides, stérols...) voire même amphiphiles.

Les molécules susceptibles de subir des transitions électroniques conduisant au phénomène de fluorescence sont appelées fluorochromes, fluorophores ou simplement colorants. Les fluorophores sont généralement des molécules linéaires et cycliques qui possèdent une ou plusieurs liaisons conjuguées. Il en existe plusieurs milliers actuellement connus. Ces molécules sont subdivisées en deux classes, les fluorophores intrinsèques et les fluorophores extrinsèques.



**Photo 2.** Fluoromx-4 spectrofluorimètre (Horiba Jobin Yvon).

une diminution de l'intensité de fluorescence par le phénomène d'extinction (« *quenching* ») de fluorescence et une distorsion du spectre d'excitation apparaît (Genot et al 1992a). Pour contourner ce problème, la méthode de SF frontale peut être employée (Genot et al 1992b). Dans ce cas, l'analyse de l'échantillon est généralement réalisée sous un angle de  $54^\circ$  par rapport à l'échantillon.

Cette technique rapide et non-destructive présente donc un intérêt évident pour la caractérisation des produits alimentaires en dépit des effets de surface inhérent à l'échantillon. Toutefois, hormis quelques études (Genot et al 1992b, Zandomeneghi 1999), ce n'est qu'à partir des années 2000 que de nombreuses recherches ont été menées sur le potentiel de cette méthode pour caractériser les produits alimentaires

(lait, fromage, viande, poisson, œuf, miel...) (Dufour et Frencia 2001, Dufour et al 2003).

*b) La spectroscopie de fluorescence synchrone*

Le plus souvent, les données de fluorescence sont présentées sous forme de spectres d'excitation ou d'émission. L'utilisation de ces spectres est très intéressante

lorsque le manipulateur connaît l'échantillon à analyser ainsi que les fluorophores qui le constituent. Cependant, le plus souvent l'opérateur manque de connaissance sur son échantillon et il peut avoir recours à une autre méthode d'acquisition qui est la spectroscopie d'excitation en mode synchrone. La mise en œuvre de cette méthode nécessite une variation simultanée des longueurs d'onde d'excitation et d'émission, tout en gardant entre elles un décalage constant  $\Delta\lambda$  ( $= \lambda_{\text{émission}} - \lambda_{\text{excitation}}$ ) (Patra et Mishra 2002). Cette méthode présente l'avantage de pouvoir caractériser plusieurs fluorophores à partir d'un seul spectre. La principale difficulté rencontrée dans l'application de cette technique est que le  $\Delta\lambda$  optimal doit être connu *a priori*. De plus, l'utilisation de plusieurs  $\Delta\lambda$  différents est parfois nécessaire pour obtenir une identification complète des différents fluorophores de l'échantillon. Cette technique, très répandue dans le domaine de la pétrochimie, n'a été que récemment exploitée en agroalimentaire pour discriminer différents produits en fonction de leurs origines (Abbas *et al* 2012), pour étudier les changements de structure des composants de produits laitiers et carnés au cours de traitements technologiques (chauffage, cuisson et acidification) (Boubellouta 2011, Sahar *et al* 2009) ou pour prédire la composition de ces produits (Abbas *et al* 2012, Ouanezar *et al* 2012).

### 3 / Applications à l'évaluation de la qualité de la viande

#### 3.1 / Prédiction de la composition chimique globale de la viande

La viande est composée d'eau, de protéines, de graisses, de matières minérales, etc. Chacun de ces éléments présente, pour l'Homme, des intérêts énergétiques et nutritionnels différents. Ils peuvent renseigner aussi sur la qualité gustative, la salubrité ou la valeur diététique (Weer-anantanaphan *et al* 2011).

La capacité de la SPIR à prédire la composition chimique de la viande a été étudiée par un certain nombre de scientifiques dans les différentes espèces animales : bovine (Ripoll *et al* 2008), ovine (Cozzolino et Murray 2002), porcine (Zamora-Rojas *et al* 2013), aviaire (Berzaghi *et al* 2005) ou cunicole (Masoero *et al* 2004).

Les protéines constituent le principal composé nutritionnel de la viande. Les résultats de la prédiction par SPIR de la teneur globale en protéines de la viande sont variables avec des coefficients de détermination ( $R^2$ ) compris entre 0,30 et 0,90, mais la plupart des études montrent des  $R^2$  de 0,60 à 0,80 à l'exception

des travaux sur les poulets pour lesquels les  $R^2$  sont en général supérieures à 0,90 (Cozzolino et Murray 2002, Berzaghi *et al* 2005, De Marchi *et al* 2007).

Les modèles de prédiction par SPIR de la teneur en eau ou de la teneur en matière sèche de la viande présentent des résultats très variables,  $R^2$  de 0,07 (Cozzolino et Murray 2002) jusqu'à 0,96 (De Marchi *et al* 2007) selon les études, bien que la moitié des publications consultées montrent des valeurs de  $R^2$  égales ou supérieures à 0,90.

La teneur en matières grasses peut avoir un rôle important sur la qualité gustative de la viande. Les résultats obtenus montrent des  $R^2$  variant entre 0,19 et 1, toutefois la plupart des études montrent des valeurs de  $R^2$  supérieures à 0,90.

La variabilité des résultats obtenus pour l'ensemble des déterminations de la composition chimique peut être expliquée principalement par les caractéristiques de la viande, par la préparation et par la présentation des échantillons. La viande est un matériel hétérogène constitué de fibres disposées en différents faisceaux (Listrat *et al* 2015, ce numéro), ce qui fait augmenter la proportion des effets de diffusion de la lumière dans le spectre. Ainsi, la présence de différents tissus au sein du muscle fait qu'il est très difficile d'obtenir des échantillons représentatifs. La préparation et la présentation des échantillons au spectromètre joue un rôle très important sur les résultats obtenus (Cozzolino et Murray 2002, De Marchi *et al* 2007). Quand les échantillons sont présentés sous forme intacte à l'appareil, les relations entre les valeurs prédites par la SPIR et les résultats obtenus par les mesures de références sont plus faibles que lorsque les échantillons sont broyés et/ou lyophilisés. Cozzolino et Murray (2002) rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,07, 0,49 et 0,89 pour les teneurs en eau, protéines et lipides respectivement pour des modèles de prédiction calculés à partir d'échantillons intacts, tandis que les modèles construits sur des échantillons broyés présentent des valeurs de  $R^2$  de 0,98, 0,81 et 0,96 pour ces mêmes déterminations. Concernant la lyophilisation, De Marchi *et al* (2007) rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,85 et 0,99 pour les modèles de prédiction de la teneur en protéines à partir d'échantillons hachés ou lyophilisés, respectivement, et des valeurs de  $R^2$  de 0,99 pour les modèles de prédiction de la teneur en lipides à partir des mêmes échantillons. Pour la teneur en eau, ces auteurs affichent des valeurs de  $R^2$  supérieures à 0,90 quand les modèles ont été construits sur des échantillons lyophilisés ou hachés frais.

Par ailleurs, le succès d'une prédiction par SPIR repose en partie sur la variabilité

du composé visé dans la viande : plus l'échelle de variation est grande, plus les possibilités d'obtenir une bonne prédiction sont importantes. Ripoll *et al* (2008) notent également que la différence entre le composé analysé par la méthode chimique et celui déterminé par la SPIR, peut contribuer à réduire la précision de la prédiction SPIR. Par exemple, la détermination des protéines par la méthode chimique consiste à mesurer l'azote présent dans l'échantillon alors que la SPIR va détecter la totalité des liaisons présentes dans les molécules de protéines.

L'utilisation de la SF en mode d'excitation frontal pour évaluer la composition chimique de la viande s'est focalisée sur la détermination des teneurs en matière grasse, en protéines et en eau. Le tissu adipeux contient des molécules fluorescentes qui sont spécifiques des matières grasses (Skjervold *et al* 2003) et les fibres musculaires contiennent également des molécules fluorescentes spécifiques de ce tissu (Swatland 1987b, Egelandsdal *et al* 2005). Ainsi, Wold *et al* (1999), sur des échantillons de muscle *Longissimus* (LM) hachés montrent une valeur de  $R^2$  de 0,71 entre la prédiction de la teneur en matière grasse par des signaux de fluorescence ( $\lambda_{\text{ex}} = 332$  nm ;  $\lambda_{\text{em}} = 360-600$  nm) et la teneur en matière grasse mesurée par la méthode Fosslet. Brondum *et al* (2000) rapportent des  $R^2$  plus faibles de 0,57 et 0,16 entre les prédictions par SF en mode d'excitation frontal ( $\lambda_{\text{ex}} = 280, 320, 365$  et  $395$  nm ;  $\lambda_{\text{em}} = 300-600$  nm,  $340-600$  nm,  $385-600$  nm et  $415-600$  nm respectivement) et les mesures des teneurs en matière grasse et en eau, respectivement, pour une population composée de deux muscles intacts, le *SemiTendinosus* (ST) et le LM de porc. Selon ces auteurs, ces faibles  $R^2$  sont principalement associés à la faible surface de l'échantillon analysée, non représentative de l'hétérogénéité du produit. Une étude conduite par Sahar *et al* (2008) a montré des résultats encourageants pour la prédiction de la matière sèche de 3 muscles bovins individuels non broyés (*Rectus Abdominis* (RA), ST et *InfraSpinatus* (IS)) avec des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,79 et 0,94 à partir des spectres d'émission à une  $\lambda_{\text{ex}} = 322$  nm. Cependant, lorsque le modèle est construit en considérant l'ensemble des trois muscles, la qualité de la prédiction chute (valeur de  $R^2$  de 0,26). D'après ces auteurs, cette diminution serait associée aux différences de structure existant entre les muscles RA, ST et IS.

#### 3.2 / Composition nutritionnelle

##### a) Prédiction de la composition en acides gras

Actuellement, le consommateur est de plus en plus sensible à la qualité nutrition-

nelle des produits. Ainsi, la possibilité de caractériser la composition en Acides Gras (AG) bénéfiques (comme les AG insaturés) ou indésirables (comme les AG saturés, AGS) des muscles présente un intérêt significatif pour le consommateur.

Récemment, les applications de la SPIR aux produits animaux se sont focalisées sur l'évaluation du profil en AG, particulièrement pour des produits impliqués dans des démarches officielles de qualité (Weeranantanaphan *et al* 2011).

Plusieurs études rapportent des caractérisations en AG des viandes bovines (De Marchi *et al* 2007, Sierra *et al* 2008, Prieto *et al* 2011), ovines (Guy *et al* 2011), porcines (Garcia-Olmo *et al* 2000), aviaires (Berzaghi *et al* 2005). Les auteurs s'accordent à dire que la teneur ou la proportion des principaux AG individuels de la famille des AGS et monoinsaturés (AGMI), ainsi que les sommes des AGS et des AGMI totaux sont correctement prédites. Toutefois, d'une manière générale, les AG exprimés en teneur dans le muscle sont prédits avec une précision plus élevée que ceux exprimés en proportion des AG totaux (Zhou *et al* 2012). En revanche, la teneur ou la proportion des AG polyinsaturés intramusculaires totaux et individuels sont prédits avec des valeurs de  $R^2$  inférieures à 0,60 dans la viande bovine, tandis qu'ils sont prédits avec plus de précision chez le poulet et l'agneau (Berzaghi *et al* 2005, Guy *et al* 2011). Garcia-Olmo *et al* (2000) montrent que chez le porc, la teneur en C18:2 n-6 est très bien estimée par SPIR. Sierra *et al* (2008) expliquent que cette difficulté de prédiction des teneurs en AGPI dans la viande bovine serait liée d'une part, à la configuration chimique des AG qui présentent tous un groupement  $\text{CH}_2$  absorbant aux mêmes longueurs d'onde dans le PIR, et d'autre part, au fait que les teneurs ou les proportions en AGPI sont assez homogènes dans les échantillons, entraînant une faible précision des modèles d'étalonnage. Cette dernière explication semble plus pertinente, car la variabilité de teneur en AGPI chez les animaux monogastriques est plus élevée que chez le bovin. En effet, chez les ruminants une partie des AGPI est hydrogénée dans le rumen, entraînant une moindre variabilité des teneurs en AGPI dans le tissu musculaire. La diversité des conditions d'alimentation induisant une plus grande variabilité de la composition en AG chez l'agneau que chez le bovin, explique les meilleurs résultats de prédiction obtenus chez l'ovine que chez le bovin. De même, Mourot *et al* (2014) ont obtenu une augmentation des performances des modèles d'étalonnage des AGPI de la viande en utilisant une base de données composée d'échantillons de bovins et d'agneaux par rapport aux résultats obtenus à partir de la base de données des bovins seulement.

Ces dernières années, des travaux ont été conduits pour prédire la composition en AG directement sur les carcasses, les mesures étant réalisées sur la surface du muscle intact. La détection des AG sur les carcasses est nettement moins bonne que dans le muscle broyé avec des valeurs de  $R^2$  inférieures à 0,70 pour l'ensemble des AG, sauf pour l'acide linoléique (Prieto *et al* 2011), en raison essentiellement de l'hétérogénéité physique du muscle intact.

Même si la plupart des auteurs s'accordent à affirmer que les teneurs en AG (AGS et AGMI) sont correctement prédites par la SPIR, la précision des modèles SPIR est très variable d'une étude à l'autre. Le manque d'homogénéité dans la préparation des échantillons et l'utilisation de méthodes de référence différentes pour une même détermination, ainsi que le type d'appareil utilisé sont en partie responsables de cette variabilité (Zamora-Rojas *et al* 2013). Ces auteurs ont comparé deux appareils pour prédire la teneur en certains AG (C18:0, C18:1, C18:2 n-6, et C16:0) sur des porcs ibériques. Un appareil fixe déterminait les spectres entre 780 et 2208 nm tandis que l'autre était un appareil portable qui mesurait l'absorbance entre 1 600 et 2 208 nm. Sur du tissu adipeux intact ces auteurs ont montré des valeurs de  $R^2$  de 0,85 ; 0,92 ; 0,84 et 0,94 pour prédire la teneur en AG C16:0, C18:0, C18:1 et C18:2 n-6 avec l'appareil fixe, tandis, qu'ils rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,78 ; 0,83 ; 0,84 et 0,81 pour la prédiction de ces mêmes AG à partir des mesures sur carcasses avec l'appareil portable. Ces résultats sont très encourageants pour le développement d'appareils adaptés aux conditions industrielles.

Mourot *et al* (résultats non publiés) dans une étude terrain réalisée dans le cadre du projet SPECTRAG, ont comparé l'utilisation de sept appareils sur des tissus adipeux non broyés pour prédire la teneur en AG. Les résultats obtenus sont moins précis que ceux présentés dans d'autres espèces pour les AGS et AGMI. Ceci est expliqué par le type d'alimentation des animaux, moins variée que celle utilisée dans d'autres études (notamment sur le porc ibérique), mais ces auteurs rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,80 et 1 pour les teneurs en AGPI n-6 et les AGPI totaux. L'enrichissement de l'alimentation des animaux en AGPI se traduit alors par une augmentation de la variabilité de ces AG dans les tissus (Mairesse *et al* 2012) et donc par une amélioration des résultats de prédiction.

Le muscle utilisé pour la réalisation des étalonnages pourrait avoir une influence sur les résultats obtenus. Mourot *et al* (2015) ont comparé la prédiction par la SPIR des teneurs en AG à partir des

modèles différents réalisés sur 3 muscles des mêmes animaux : LM, RA et ST. Ces auteurs montrent que les modèles développés à partir de LM sont plus précis que ceux obtenus à partir de RA et ST. Ces résultats seraient en étroite relation avec la plage de variation des données des AG des populations des différents muscles.

A notre connaissance, il existe une seule étude dans laquelle les SF frontale et synchrone ont été utilisées pour prédire la teneur en AG de la viande bovine (Ouanazar *et al* 2012). Les résultats ont montré l'intérêt de ces deux méthodes avec des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,13 et 0,89 respectivement pour le C20:3 n-3 et la somme des AGS linéaires. D'après ces premiers résultats, il semble que la qualité de la prédiction dépend fortement de la plage de variation de la teneur en AG et que la SF synchrone soit plus intéressante que la SF frontale pour prédire les teneurs en AG. Cependant, les deux modes d'acquisition ne permettent pas une bonne prédiction des teneurs en AGPI tels que les n-3 et n-6. L'absence d'étude autour de cette problématique est surprenante car la SF est sensible à un certain nombre de fluorophores liposolubles possédant des doubles liaisons, qui pourraient donner une idée précise de la composition en AGPI de la viande.

#### b) Prédiction d'autres composés d'intérêt nutritionnel

Quelques études ont été réalisées pour essayer de prédire la teneur en cholestérol par la SPIR. Les résultats obtenus sont contradictoires. Bajwa *et al* (2009) en utilisant le domaine visible (VIS)-PIR sur de la viande bovine intacte ont obtenu des  $R^2$  de 0,80 pour la prédiction de ce composé tandis que Berzaghi *et al* (2005) rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,34 sur de la viande hachée de poulet.

Bien que les minéraux n'absorbent pas dans le PIR, González-Martín *et al* (2002) et Viljoen *et al* (2007) ont essayé d'utiliser la SPIR pour prédire la teneur en certains minéraux sur de la viande d'agneau et de porc. Ils ont développé des modèles caractérisés par des  $R^2$  compris entre 0,74 et 0,79 chez l'agneau pour la prédiction des teneurs en Fe, Na, K, P, Mg, et Zn (Viljoen *et al* 2007) et des  $R^2$  compris entre 0,64 et 0,84 pour la prédiction des teneurs en Fe, Zn, Ca, Na et K chez le porc (González-Martín *et al* 2002). L'association des minéraux à des molécules organiques qui absorbent dans le PIR (Andrés *et al* 2008) peut expliquer ces relations.

Les teneurs en collagène ou en hydroxyproline, qui peuvent être associées à la dureté de la viande (Prieto *et al* 2006, cf. Listrat *et al* 2015, ce numéro), sont

d'autres caractéristiques que certains auteurs ont essayé de prédire par la SPIR. Prieto *et al* (2006) rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,47 sur la viande bovine, tandis que González-Martín *et al* (2009) rapportent des valeurs de 0,64 sur des saucisses de porc. Selon Downey et Hildrum (2004) les faibles relations entre la teneur en collagène mesurée et prédite par SPIR pourraient être expliquées par la présence majoritaire des protéines fibrillaires dans le muscle, dont leur absorbance dans le PIR ne différerait pas de celle du collagène. Par ailleurs, González-Martín *et al* (2009) suggèrent une relation étroite entre les valeurs de  $R^2$  du modèle SPIR et la variabilité de la population utilisée pour son développement. Dans une étude préliminaire réalisée à l'INRA de Theix, Listrat *et al* (2014) ont obtenu des  $R^2$  de 0,88 pour la prédiction par la SPIR de la teneur en collagène total d'une population de muscles de bovins. Ceci montre que la détermination de la teneur de cette molécule dans la viande par cette méthode est possible.

Swatland (1987a) a démontré que les collagènes de types I et III présentent des spectres d'émission différents et que le spectre d'émission de l'élastine est similaire à celui du collagène de type I. Avec un  $\lambda_{ex}$  proche du maximum d'excitation situé à 370 nm, le collagène de type I présente des pics d'émission élevés à 440 nm et faibles vers 510 nm. La fluorescence du collagène de type III présente un profil inverse. D'après cet auteur, cette différence de fluorescence semble associée à la taille des fibres de collagène, plus petites pour celles formées par le type III que celles formées par le type I. Ainsi, l'une des premières études visant à prédire les teneurs en élastine et en collagène de type I par SF frontale dans de la viande de bœuf hachée a été conduite par Swatland (1987b). Cet auteur rapporte un  $R^2$  de 0,85 en utilisant le ratio des bandes d'émission à 510/440 nm après excitation à 365 nm, pour prédire la teneur en cartilage de cinq préparations de viande hachée dont la teneur variait de 0 à 100%. Ces travaux ont été poursuivis par Wold *et al* (1999) sur des muscles LM hachés de bovin : ils rapportent des  $R^2$  de 0,96 entre la teneur en hydroxyproline et les spectres de fluorescence ( $\lambda_{ex} = 380$  nm). Plus récemment, Egeland *et al* (2005) ont obtenu des modèles de prédiction caractérisés par des  $R^2$  supérieurs à 0,92 dans des produits complexes (saucisses) après excitation à 380 nm. L'étude conduite par Sahar *et al* (2008) a montré des résultats encourageants pour la prédiction de la teneur en collagène de trois muscles individuels de bovins (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,57 et 0,71) à partir des spectres d'émission du tryptophane ( $\lambda_{ex} = 290$  nm). Cependant, comme pour la teneur en eau, lorsque le modèle est construit en consi-

dérant les trois muscles simultanément la qualité de la prédiction chute ( $R^2$  de 0,32). D'après ces auteurs, la diminution de la qualité de la prédiction résulterait de la différence de structure entre les muscles étudiés.

L'oxydation des lipides et des protéines est l'un des facteurs limitant la qualité et l'acceptabilité de la viande et des produits carnés par les consommateurs. Lors de l'oxydation des lipides, les composés aldéhydiques peuvent réagir avec les groupes aminés libres des protéines (tels que la lysine) pour donner des bases de Schiff fluorescentes (ex. lipofuscine) (Kagan 1988). La fluorescence pourrait ainsi être utilisée pour évaluer l'état d'oxydation de produits animaux. Cette hypothèse a tout d'abord été confortée par Hasegawa *et al* (1992) lors d'une étude sur du poisson séché. Concernant les produits carnés, dans une première étude portant sur différents types de viande hachée (porc et dinde), Veberg *et al* (2006a) ont démontré que le signal de fluorescence est sensible à l'oxydation après addition de différentes concentrations en composés aldéhydiques. Ensuite, cette même équipe a constaté une augmentation significative de la fluorescence de surface de ces viandes conditionnées sous une atmosphère riche en oxygène (Veberg *et al* 2006b). Cependant, Gatellier *et al* (2007) ont montré une faible corrélation ( $R^2 = 0,53$ ) entre le maximum de fluorescence enregistré à 475 nm après excitation à 380 nm et le niveau d'oxydation des lipides. Ce résultat pourrait toutefois être amélioré en calculant des régressions en considérant l'ensemble du spectre d'émission.

### 3.3 / Prédiction des caractéristiques technologiques et sensorielles de la viande

#### a) Caractéristiques technologiques

Concernant la prédiction de la valeur de pH du muscle, plusieurs études réalisées sur de la viande de bœuf, d'agneau, de porc ou de volaille ne montrent pas de corrélation élevée avec la SPIR (Prieto *et al* 2008, De Marchi 2013, De Marchi *et al* 2013) (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,07 et 0,62). La mesure du pH est entre autres liée à la structure du muscle et au réseau tissulaire des myofibrilles (Lebret et Picard 2015, ce numéro). Le conditionnement des échantillons pourrait donc jouer sur les résultats obtenus (Prieto *et al* 2009). A l'inverse de résultats obtenus pour la prédiction de la composition chimique et la composition nutritionnelle de la viande, le broyage des échantillons avant la saisie par l'instrument réduirait la précision de la prédiction à cause de la dénaturation de la structure du muscle et donc du change-

ment de la dispersion de la lumière par rapport au muscle intact. Un autre facteur réduisant cette précision serait la faible variabilité des valeurs de pH (Berzaghi *et al* 2005). Au contraire, Savenije *et al* (2006) suggèrent la SPIR comme une bonne alternative pour la mesure du pH car la méthode de référence (pH mètre) serait lente et peu précise en conditions de routine. Ces éléments sont confirmés par Cozzolino et Murray (2002) et par Andrés *et al* (2008) qui obtiennent des prédictions avec des  $R^2$  de 0,81 et 0,97 respectivement.

Une caractéristique technologique intéressante de la viande est la couleur. Celle-ci est un des principaux critères d'appréciation de la viande par le consommateur. Elle est classiquement déterminée par les indices  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  (CIE 1978 ; Lebret et Picard 2015, ce numéro). Elle pourrait être aussi déterminée par la SPIR. Les études évaluant la capacité de la SPIR pour mesurer ces indices donnent des résultats contradictoires. Bien que les méthodes de mesures soient les mêmes entre études, leurs conditions d'application sont variables (moment de la réalisation de la mesure, conditionnement de l'échantillon...), ce qui pourrait expliquer en partie la variabilité des résultats. Liu *et al* (2003), Leroy *et al* (2004), Prieto *et al* (2008, 2009) ainsi que De Marchi *et al* (2013) ont rapporté des prédictions avec des valeurs de  $R^2$  supérieures à 0,78. A cela, il faut ajouter que tous ces auteurs ont réalisé la saisie spectrale sur l'échantillon utilisé pour les mesures de référence. La préparation de l'échantillon a également un impact sur la qualité des résultats obtenus. Les résultats plus performants sont généralement obtenus sur des muscles intacts plutôt que transformés. Cependant, Prieto *et al* (2008) ont obtenu des valeurs de  $R^2$  de 0,87 et 0,90 respectivement pour les indices  $L^*$  et  $b^*$  sur de la viande hachée. Le hachage dénature grossièrement la structure du muscle, ce qui ne doit pas avoir de conséquence pour la mesure de ces indices. Cecchinato *et al* (2011), dans les mêmes conditions que Prieto *et al* (2008) mais sur des muscles broyés (dénaturation plus importante), trouvent des niveaux de prédiction moins élevés (valeurs de  $R^2$  de 0,64 et 0,44 pour  $L^*$  et  $b^*$  respectivement).

La prédiction des paramètres  $L^*$  et  $b^*$  pourrait être réalisée à partir du segment infrarouge (800-2500 nm) du spectre. Leroy *et al* (2004) et Prieto *et al* (2008) travaillant sur ce segment rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,75 et 0,90 pour ces mesures. Selon Murray et Williams (1987), ces déterminations sont en relation avec la quantité de liaisons C-H présentes dans le gras intramusculaire. Par ailleurs, pour une prédiction réussie de l'indice  $a^*$  l'utilisation de la partie

visible du spectre (400-700 nm) dans la capture des spectres est importante. Dans ces conditions Liu *et al* (2003) rapportent des valeurs de  $R^2$  supérieures à 0,86. Ceci pourrait être expliqué par la corrélation entre l'indice  $n^*$ , la quantité d'eau de la viande et la concentration de myoglobine et de ses dérivés. En effet, le domaine d'absorption de la myoglobine se trouve dans le segment du visible (405-1100 nm) (Prieto *et al* 2009).

La capacité de rétention en eau de la viande est une composante importante de la qualité, car elle influence les rendements de transformation des produits cuits ainsi que les qualités organoleptiques de la viande (Lebret et Picard 2015, ce numéro). La plupart des auteurs sont d'accord sur la capacité limitée de la SPIR pour prédire cette détermination (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,001 et 0,58) (Prieto *et al* 2008). Selon Prieto *et al* (2009), l'hétérogénéité des échantillons de viande peut influencer la méthode physique de mesure ainsi que les spectres SPIR et amener à des faibles valeurs de  $R^2$  des modèles de prédiction SPIR.

A notre connaissance, à ce jour une seule étude a été conduite pour évaluer la capacité de rétention en eau de la viande par SF frontale (Brondum *et al* 2000). Les modèles ont été construits en considérant une population de 32 muscles de porc (ST et LM) non broyés. Sur chaque muscle, des spectres d'émission de fluorescence ( $\lambda_{ex}$  : 280, 320, 365 et 395 nm) et des mesures de rétention en eau par la méthode du papier-filtre ou de mesure de l'exsudation ont donné respectivement des  $R^2$  de 0,46 et 0,21. Ces auteurs concluent que les faibles corrélations résulteraient de l'hétérogénéité des muscles analysés. Cependant, il semble que la qualité de la prédiction soit aussi associée à la précision de la méthode de référence utilisée.

#### b) Caractéristiques sensorielles

Les critères sensoriels les plus importants pour les consommateurs sont l'aspect, la texture (tendreté et jutosité) et la saveur de la viande. Toutes ces caractéristiques résultent de la teneur en différents composants chimiques, de caractéristiques structurales ou de paramètres technologiques (teneur en lipides, collagène, typologie des fibres, pH...). Plusieurs auteurs ont donc émis l'hypothèse qu'il serait possible de prédire avec précision la qualité sensorielle de la viande par la SPIR (Venel *et al* 2001, Prieto *et al* 2009). Malheureusement, cette hypothèse n'a pas été validée (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,10 et 0,58). Plusieurs problèmes ont été identifiés pouvant nuire à la prédiction de la qualité sensorielle de la viande. 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. Le fait que les échantillons scannés en PIR 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 entraîner des biais importants. Contrairement aux études citées ci-dessus, Ripoll *et al* (2008) rapportent 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 couramment utilisées pour évaluer les caractéristiques sensorielles de la viande. Cependant, l'ensemble des résultats obtenus indique que la SPIR ne constitue pas encore une méthode adaptée à la prédiction de la qualité sensorielle de la viande évaluée par un jury de dégustation.

La prédiction de la tendreté de la viande *via* le développement de modèles entre l'information spectrale PIR et la force de cisaillement donne des résultats variables (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,01 et 0,74) (Andrés *et al* 2008, Cecchinato *et al* 2011, De Marchi 2013, De Marchi *et al* 2013). Selon Leroy *et al* (2004), ceci peut s'expliquer par la faible variabilité des données de référence entre échantillons, tandis que Prieto *et al* (2008) remarquent une grande variabilité des résultats entre duplicats par la méthode Warner-Braztler (WBSF) pour un même échantillon. Ces arguments pourraient contribuer à expliquer les faibles relations obtenues entre SPIR et WBSF. Selon Liu *et al* (2003) et De Marchi *et al* (2007), l'hétérogénéité d'un muscle contribuerait à expliquer la variabilité de la détermination WBSF ainsi que les résultats des modèles obtenus par la SPIR car la zone de la viande analysée par infrarouge ne correspond pas à celle utilisée pour la mesure de WBSF. Cependant, selon De Marchi *et al* (2013) le fait d'homogénéiser le muscle en le broyant n'améliore pas les valeurs de  $R^2$  obtenues, et cela aurait même tendance à dégrader les résultats des modèles. Ces auteurs expliquent ce constat par l'altération de la structure du muscle provoquée par l'homogénéisation, qui détruit ou altère l'arrangement des fibres et donc modifie l'information spectrale dans le PIR.

La possibilité d'utiliser la SF comme outil de prédiction des caractéristiques sensorielles, notamment de la tendreté, est basée sur les résultats de cette technique pour la prédiction du collagène, de l'élastine et du tissu adipeux des pro-

duits carnés (Swatland 1987a, Sahar *et al* 2008). Les résultats obtenus pour les modèles reliant la SF et les caractéristiques sensorielles des viandes sont variables. Ainsi, Egelandstad *et al* (1996) ont montré qu'il existait une corrélation significative entre la force à la rupture du périnysium obtenu après dissection de muscles masséter de bovins et les spectres d'émission enregistrés après excitation à 280 ou 335 nm (valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,38 et 0,86). Egelandstad *et al* (2002) rapportent des valeurs de  $R^2$  entre 0,20 et 0,71 entre l'énergie maximale nécessaire pour le cisaillement déterminée par WBSF et les spectres d'émission de fluorescence obtenus après excitation à 322 ou 380 nm, sur différents lots de LM de bœuf. Cependant, les résultats rapportés par Swatland *et al* (1995) sur ce même muscle montrent des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,22 et 0,42 entre les notes de tendreté attribuées par un panel de dégustateurs et les spectres de fluorescence obtenus après excitation à 365 nm. Par ailleurs, sur des muscles ST, ces auteurs affichent des valeurs de  $R^2$  comprises entre 0,37 et 0,74.

Les faibles corrélations entre les mesures de tendreté de la viande et les spectres de fluorescence après excitation en mode frontal classique semblent associées à la faible teneur en collagène des muscles étudiés, à la faible variabilité de ces mesures, au nombre limité d'échantillons et aux longueurs d'onde d'excitation employées dans ces études, qui ne seraient pas très adaptées pour la construction des modèles. Ainsi, d'autres études ont suggéré qu'une excitation à 290 nm (spectres de fluorescence du tryptophane) peut contenir des informations relatives aux caractéristiques rhéologiques et sensorielles de la viande (Dufour et Frencia 2001, Frencia *et al* 2003, Clerjon *et al* 2011) ou des saucisses (Allais *et al* 2004) bien que Lebecque *et al* (2003) rapportent des valeurs de  $R^2$  de 0,32 entre la SF frontale déterminée à cette même longueur d'onde et les mesures de tendreté. L'utilisation d'un mode d'acquisition synchrone dont le principe permet d'accéder simultanément à l'ensemble des fluorophores présent dans la viande, permettrait probablement d'améliorer les niveaux de prédiction.

## 4 / Traçabilité

Ces dernières années, la demande croissante des consommateurs envers la qualité et les conditions de production des denrées alimentaires a incité les fournisseurs à améliorer l'information disponible. Une autre possibilité d'utilisation de la SPIR et de la SF est la classification des échantillons selon différents critères en relation avec la qualité, la traçabilité (ou l'authenticité) des viandes : origine,

adultération (mélange de viandes de différentes espèces, ajout de substances frauduleuses), etc.

En ce qui concerne la SPIR, dans une optique de détection des fraudes, Cozzolino et Murray (2004) ont utilisé le segment VIS-PIR pour différencier la viande de bœuf, d'agneau, de porc et de poulet avec 80% de résultats corrects. D'autres études s'intéressent à la détection de substances étrangères dans la viande à l'aide de la SPIR. Ding et Xu (2000) ont ainsi essayé de différencier les hamburgers contenant 100% de bœuf de ceux contenant frauduleusement de la viande de porc, d'agneau, du lait ou de la farine incluses à des taux variant entre 5 et 25%. L'exactitude des résultats augmente proportionnellement avec la quantité de produit frauduleux incorporé. Par ailleurs, Morsy et Sun (2013) ont obtenu 100% d'échantillons bien classés en cherchant à différencier de la viande de bœuf hachée et de la viande de bœuf hachée contaminée par de la viande de porc ou des déchets de carcasse.

La SPIR a également été utilisée avec succès pour discriminer la viande fraîche de celle décongelée. Ainsi, Downey et Beauchêne (1997) rapportent des taux de 64% de classification correcte d'échantillons de bœuf intacts, et Thyholt et Issakson (1997) obtiennent 100% d'échantillons bien classés en travaillant à partir des jus d'exsudation. La dénaturation des protéines sous l'effet de la décongélation pourrait expliquer ces résultats.

Dian *et al* (2007, 2008) se sont intéressés à l'utilisation de la zone spectrale du visible comprise entre 410-510 nm, la totalité du segment visible (400-700 nm) et du VIS-PIR (400-2500 nm) pour le classement de carcasses d'agneaux selon le type d'alimentation. Sur des échantillons de gras périrénal, en utilisant le segment VIS-PIR, ils ont pu différencier des carcasses d'agneaux nourris à l'herbe de ceux élevés en bergerie et recevant une ration à base de paille et de concentré, avec un taux de réussite supérieur à 98%. Dans ces résultats, la partie visible du spectre est très importante (94%) (Dian *et al* 2008). Les résultats de cette classification sont en relation avec la composition chimique des échantillons issus de chaque régime. Ainsi, ces auteurs suggèrent que cette classification est possible grâce à la différence entre les quantités absorbées en pigments caroténoïdes, en pigments hémiques et en acides gras.

Dans le domaine de la fluorescence, différentes études ont été entreprises pour discriminer différents muscles bovins entre eux. Dufour et Frencia (2001) ont mesuré les spectres d'émission du tryptophane de muscles *Longissimus Thoracis*

(LT) et IS à 2 et 16 jours post-mortem (*p.m.*) Sur la base des profils spectraux, il a été possible de discriminer les muscles grâce à la position du maximum d'émission observée à 336 nm qui présente un décalage en fonction du muscle et du temps de maturation (Hildrum *et al* 2006). Dufour et Frencia (cité par Hildrum *et al* 2006) en travaillant sur les spectres de 5 muscles (*Tensor fasciae Latae*, LT, ST, IS et *Triceps Branchi*) après 2 et 14 jours de maturation, rapportent un taux de bonne classification de 82% entre muscles en fonction de leur maturation. D'après ces auteurs, les spectres constituent une empreinte digitale du produit résultant des propriétés de fluorescence de l'ensemble des protéines de la viande (myofibrilles, protéines, sarcoplasmiques, collagène...) et de leurs évolutions au cours de la maturation. Enfin, ces résultats montrent de façon indéniable que la SF peut être utilisée pour la classification des muscles.

## 5 / Comparaison des méthodes

La SPIR et la SF sont des techniques de mesures physiques rapides à mettre en œuvre, non destructives des échantillons et une fois étalonnées elles sont multiparamétriques. Ces deux techniques peuvent être utilisées en ligne et hors ligne sur les sites de production pour la conduite des procédés et/ou la réalisation de contrôles qualité sur les produits. Toutefois, ces techniques réalisent des mesures indirectes nécessitant au préalable un étalonnage robuste des modèles de prédiction ciblé sur le paramètre souhaité. Pour cela des connaissances en chimométrie et en analyse spectrale sont nécessaires. L'utilisation de la SPIR serait limitée à la présence de molécules organiques et d'autres composants non organiques, importants dans l'évaluation de la qualité des produits, tels que les minéraux doivent être prédits indirectement. La SF est une méthode beaucoup plus spécifique que la SPIR car elle n'est sensible qu'aux composants fluorescents. Cependant, plusieurs auteurs ont montré la possibilité de construire des modèles de prédiction pour des composés n'ayant pas cette propriété (minéraux, pH).

Bien que les deux techniques soient rapides à mettre en œuvre, la mise au point de la SF nécessite une étape supplémentaire pour identifier la longueur d'onde d'excitation et/ou d'émission optimale pour l'échantillon et le composant à prédire.

La présence de certains composés en quantité importante dans des produits comme l'eau, peut jouer sur les performances des modèles d'étalonnage en SPIR. En effet, l'eau absorbe de façon importante dans la région du PIR, ses

bandes d'absorption peuvent cacher des bandes d'autres composants et affecter les résultats des modèles de prédiction. La SF n'est pas influencée par ce phénomène.

Par ailleurs, la SF est connue pour être 100 à 1000 fois plus sensible que la SPIR. Elle serait donc plus adaptée pour la prédiction des composés présents en faible concentration. Ainsi la SF a été utilisée avec succès pour la prédiction de vitamines dans différents produits alimentaires (huile d'olive, lait...).

En ce qui concerne la prédiction des paramètres de qualité de la viande, le nombre d'articles publiés sur l'utilisation de la SPIR est beaucoup plus élevé que celui des articles consacrés à la SF. La comparaison des résultats entre les deux techniques est difficile à réaliser, car les deux techniques n'ont pas été appliquées sur les mêmes bases de données. Comme cela a déjà été évoqué, le jeu de données utilisé pour le développement des modèles d'étalonnage peut jouer sur les résultats obtenus. Néanmoins, selon les résultats de la littérature, en général la SPIR se montrerait plus performante que la SF pour la prédiction de la composition chimique globale et la composition nutritionnelle de la viande, notamment la prédiction des AG. En revanche, la SF montre en général des valeurs de  $R^2$  plus élevées pour la détermination du collagène. En ce qui concerne la prédiction des paramètres technologiques et sensoriels, les deux techniques montrent une précision similaire. Finalement, bien que les deux techniques aient été utilisées pour la traçabilité de la viande, les critères pour lesquels ces techniques ont été utilisées sont différents.

## Conclusion

Les méthodes non destructives pour la détermination de la qualité de la viande sont accueillies avec intérêt par les industries. La SPIR et la SF sont des techniques rapides, souples et précises qui présentent un potentiel énorme pour la prédiction des paramètres de qualité des produits. Elles ont été utilisées avec succès sur un grand nombre de produits agricoles. Bien qu'au cours de ces dernières années l'effort de recherche et les avancées obtenues dans le domaine de la prédiction de la qualité de la viande aient été importants, les résultats sont encore assez variables et ne sont pas totalement satisfaisants pour la prédiction en pratique de la plupart des paramètres de qualité. La complexité et l'hétérogénéité du muscle semble être le principal facteur responsable de cette limite.

L'application de ces techniques, notamment de la SPIR semble à ce jour un peu



plus avancée pour des finalités qualitatives comme la traçabilité. Cependant, un effort de recherche est encore nécessaire afin de pouvoir réaliser ces analyses qualitatives dans des conditions pratiques.

Ces dernières années, de nouvelles technologies basées sur l'imagerie dans le PIR en mode hyper-spectral et l'imagerie de fluorescence en mode multi-spectral se sont développées dans tous les domaines de l'analyse des aliments. Ces technologies combinent une caméra

et un détecteur spectral permettant d'intégrer l'hétérogénéité de l'échantillon lors de l'analyse. Il semble d'après les premières études que ces méthodes présentent un potentiel pour prédire la composition chimique de la viande et sa tendreté.

## Références

- Abbas K., Karoui R., Ait-Kaddour A., 2012. Application of synchronous fluorescence spectroscopy for the determination of some chemical parameters in PDO French blue cheeses. *Eur. Food Res. Technol.*, 234, 457-465.
- Allais I., Viaud C., Pierre A., Dufour E., 2004. A rapid method based on front-face fluorescence spectroscopy for the monitoring of the texture of meat emulsions and frankfurters. *Meat Sci.*, 67, 219-229.
- 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 Sci.* 78, 217-224.
- Bajwa S.G., Kandaswamy J., Apple J.K., 2009. Spectroscopic evaluation of the nutrient value of ground beef patties. *J. Food Eng.*, 92, 454-460.
- Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J., 1989. Standard normal variate transformation and de-trending of near infrared diffuse reflectance spectra. *Appl. Spectrosc.*, 43, 772-777.
- Ben-Gera I., Norris K.H., 1968. Direct spectrophotometric determination of fat and moisture in meat products. *J. Food Sci.*, 33, 64-67.
- Bertrand D., 2002. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA Prod. Anim.*, 15, 209-219.
- Berzaghi P., Dalla 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. *Poult. Sci.*, 84, 128-136.
- Boubellouta T., Galtier V., Dufour E., 2011. Structural changes of milk components during acid-induced coagulation kinetics as studied by synchronous fluorescence and mid-infrared spectroscopy. *Appl. Spectrosc.*, 65, 284-292.
- Brondum J., Munck L., Henckel P., Karlsson A., Tornberg E., Soren B.E., 2000. Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy. *Meat Sci.*, 55, 177-185
- 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. *J. Anim. Sci.*, 89, 2687-2695.
- CIE, 1978. International Commission on illumination, recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations, psychometric color terms. CIE Publication, Paris, France.
- Clerjon S., Peyrin F., Lepetit J., 2011. Frontal UV-visible fluorescence polarization measurement for bovine meat ageing assessment. *Meat Sci.*, 88, 28-35.
- Cozzolino D., Murray I., 2002. Effect of sample presentation and animal muscle species on the analysis of meat by near infrared reflectance spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 44, 37-44.
- Cozzolino D., Murray I., 2004. Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *LTW-Food Sci. Technol.*, 37, 447-452.
- Damez J.L., Clerjon S., 2013. Quantifying and predicting meat and meat products quality attributes using electromagnetic waves: An overview. *Meat Sci.*, 95, 879-896.
- De Marchi M., 2013. On-line prediction of beef quality traits using near infrared spectroscopy. *Meat Sci.*, 94, 455-460.
- De Marchi M., Berzaghi P., Boukha A., Mirisola M., Gallo L., 2007. Use of near infrared spectroscopy for assessment of beef quality traits. *Ital. J. Anim. Sci.*, 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 Sci.*, 93, 329-335.
- Dian P.H.M., Andueza D., Barbosa C.M.P., Amoureux S., Jestin M., Carvalho P.C.F., Prado I.N., Prache S., 2007. Methodological developments in the use of visible reflectance spectroscopy for discriminating pasture-fed from concentrate-fed lamb carcasses. *Animal*, 1, 1198-1208.
- Dian P.H.M., Andueza D., Jestin M., Prado I.N., Prache S., 2008. Comparison of visible and near infrared reflectance spectroscopy to discriminate between pasture-fed and concentrate-fed lamb carcasses. *Meat Sci.*, 80, 1157-1164.
- Ding H. B., Xu R.J., 2000. Near-Infrared Spectroscopic Technique for Detection of Beef Hamburger Adulteration. *J. Agric. Food Chem.*, 48, 2193-2198.
- Downey G., Beauchêne D., 1997. Discrimination between fresh and frozen-then-thawed beef *m. longissimus dorsi* by combined visible-near infrared reflectance spectroscopy: a feasibility study. *Meat Sci.*, 45, 353-363.
- Downey G., Hildrum K.I., 2004. Analysis of meat. In: Near infrared spectroscopy in agriculture agronomy. Roberts C.A., Workman Jr. J., Reeves III J.B. (Eds). Am. Soc. Agron. Inc., Crop Sci. Soc. America Inc., Soil Sci. Soc. America Inc., Madison, USA, 599-632.
- Dufour E., Frencia J.P., 2001. Les spectres de fluorescence frontale : une empreinte digitale de la viande. *Viandes Prod. Carnés*, 22, 9-14.
- Dufour E., Devaux M.F., Fortier P., Herbert S., 2001. Delineation of the structure of soft cheeses at the molecular level by fluorescence spectroscopy-relationship with texture. *Int. Dairy J.*, 11, 465-473.
- Dufour E., Frencia J.P., Kane E., 2003. Development of rapid method based on front face fluorescence spectroscopy for the monitoring of fish freshness. *Food Res. Int.*, 36, 415-423.
- Egelandsdal B., Kvaal K., Isaksson T., 1996. Autofluorescence spectra as related to tensile properties for perimysium from bovine massetter. *J. Food Sci.*, 61, 342-347.
- Egelandsdal B., Wold J.P., Spornich A., Neegård S., Hildrum K.I., 2002. On attempts to measure the tenderness of *Longissimus Dorsi* muscles using fluorescence emission spectra. *Meat Sci.*, 60, 187-202.
- Egelandsdal B., Dingstad G., Tøgersen G., Lundby F., Langsrud Ø., 2005. Autofluorescence quantifies collagen in sausage batters with a large variation in myoglobin content. *Meat Sci.*, 69, 35-46.
- Frencia J.P., Thomas E., Dufour E., 2003. Measure of meat tenderness using front face fluorescence spectroscopy. *Sci. Aliments*, 23, 142-145.
- García-Olmo J., De Pedro E., Garrido-Varo A., Jimenez A., Salas J., Santolalla M., 2000. Fatty acids analysis of Iberian pig fat by near infrared spectroscopy (NIRS). *CIHEAM - Options Méditerranéennes. Serie A*, 41, 191-195.
- Gatellier P., Gomez S., Gigaud V., Berri C., Bihan-Duval E. L., Santé-Lhoutellier V., 2007. Use of a fluorescence front face technique for measurement of lipid oxidation during refrigerated storage of chicken meat. *Meat Sci.*, 76, 543-547.
- Genot C., Tonetti F., Monteny-Garestier T., Drapron R., 1992a. Front-face fluorescence applied to structural studies of proteins and lipid-protein interactions of visco-elastic food products. 1: Designing of front-face adaptor and validity of front-face fluorescence measurements. *Sci. Aliments*, 12, 192-212.
- Genot C., Tonetti F., Monteny-Garestier T., Drapron R., 1992b. Front-face fluorescence applied to structural studies of proteins and lipid-protein interactions of visco-elastic food products. 2- application to wheat gluten. *Sci. Aliments*, 12, 687-704.
- González Martín I., González-Pérez C., Hernández-Méndez J., Alvarez-García N., 2002. Mineral analysis (Fe, Zn, Ca, Na, K) of fresh Iberian pork loin by near infrared reflectance spectrometry. Determination of Fe, Na and K with a remote fibre-optic reflectance probe. *Anal. Chim. Acta*, 468, 293-301.

- González Martín I., Bermejo C.F., Hierro J.M.H., González C.I.S., 2009. Determination of hydroxyproline in cured pork sausages and dry cured beef products by NIRS technology employing a fibre-optic probe. *Food Control*, 20, 752-755.
- Guy F., Prache S., Thomas A., Bauchart D., Andueza D., 2011. Prediction of lamb meat fatty acid composition using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Food Chem.*, 127, 1280-1286.
- Hasegawa K., Endo Y., Fujimoto K., 1992. Oxidative deterioration in dried fish model systems assessed by solid sample fluorescence spectrophotometry. *J. Food Sci.*, 57, 1123-1126.
- Herbert S., 1999. Caractérisation de la structure moléculaire et microscopique de fromages à pâte molle. Analyse multivariée des données structurales en relation avec la texture. Thèse, Ecole doctorale Chimie Biologie et l'Université de Nantes, France, 118p.
- Hildrum K.I., Wold J.P., Segtnan V.H., Renou J.P., Dufour E., 2006. New spectroscopic techniques for online monitoring of meat quality. In: *Advanced techniques for meat processing*. Nollet L.M.L., Toldra F. (Eds). Taylor and Francis, London, UK, 88-129.
- Kagan V.E., 1988. *Lipid Peroxidation in Biomembranes*, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 29.
- Lakowicz J.R., 1999. *Principles of fluorescence spectroscopy*, Plenum Publishers, New York, USA, 954p.
- Lebecque A., Laguet A., Chanonat M., Lardon S., Dufour E., 2003. Joint analysis of sensory and instrumental data applied to the investigation of the texture of Charolais meat. *Sci. Aliments*, 23, 172-175.
- Lebret B., Picard B., 2015. Les principales composantes de qualité des carcasses et des viandes dans les différentes espèces animales. In : Numéro spécial, Le muscle et la viande. Picard B., Lebret B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, 93-98.
- Leroy B., Lambotte S., Dotreppe O., Lecocq H., Istasse L., Clinquant A., 2004. Prediction of technological and organoleptic properties of beef *Longissimus thoracis* from near-infrared reflectance and transmission spectra. *Meat Sci.*, 66, 45-54.
- Listrat A., Durand D., Micol D., Andueza D., 2014. Utilisation de la spectroscopie dans le proche infra-rouge pour prédire la composition du tissu conjonctif de la viande bovine. Résultats préliminaires. JSMTV, Clermont-Ferrand, France, 155-156.
- 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. In : Numéro spécial, Le muscle et la viande. Picard B., Lebret B. (Eds). INRA Prod. Anim., 28, 125-136.
- 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 Sci.*, 65, 1107-1115.
- 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. IFIP, INRA (Eds). *Journ. Rech. Porcine*, Paris, France, 211-212.
- Martinsen P., Schaare P., 1998. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Postharvest Biol. Techn.*, 14, 271-281.
- Masoero G., Bergoglio G., Brugiapaglia A., Destefanis G., Chicco R., 2004. FT-NIR spectroscopy of fresh and treated muscle tissue in young female rabbits. *World Rabbit Congr.*, Puebla, Mexico, 1409-1415.
- Meurens M., 2000. Acquisition et traitement du signal spectrophotométrique. In : *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*. Bertrand D., Dufour E. (Eds). Tec & Doc Editions, Paris, France, 199-211.
- Morsy N., Sun D.W., 2013. Robust linear and non-linear models of NIR spectroscopy for detection and quantification of adulterants in fresh and frozen-thawed minced beef. *Meat Sci.*, 93, 292-302.
- Mourot B.P., Gruffat D., Durand D., Chesneau G., Prache S., Mairesse G., Andueza D., 2014. New approach to improve the calibration of main fatty acids by near-infrared reflectance spectroscopy in ruminant meat. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 1848-1852.
- Mourot B.P., Gruffat D., Durand D., Chesneau G., Mairesse G., Andueza D., 2015. Breeds and muscle types modulate performance of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy to predict the fatty acid composition of bovine meat. *Meat Sci.*, 99, 104-112.
- Murray I., Williams P.C., 1987. Chemical principles of near-infrared technology. In: *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. Williams P.C., Norris K. (Eds). American Association of Cereal Chemists, St. Paul, USA, 17-34.
- Norris K.H., Hart J.R., 1965. Direct spectrophotometric determination of moisture content of grain and seeds. In: "Humidity and Moisture", 4, "Principles and Methods of Measuring Moisture in Liquids and Solids", Reinhold Publish. Corp., New York.
- Osborne B.G., Fearn T., 1988. *Near infrared spectroscopy in food analysis*. Longman Scientific and Technical, Harlow, UK, 200p.
- Ouanezar M., Gruffat D., Aït-Kaddour A., Mardon J., Jacquot S., Ferlay A., Bauchart D., 2012. Potentiel de la spectroscopie de fluorescence pour la prédiction des teneurs en acides gras dans la viande bovine: comparaison entre les méthodes frontale et synchrone. JSMTV, Caen, France, 37-38.
- Patra D., Mishra A.K., 2002. Recent developments in multi-component synchronous fluorescence scan analysis. *Trends Anal. Chem.*, 21, 787-798.
- Prieto N., Andrés S., Giráldez F.J., Mantecón A.R., Lavín P., 2006. Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples. *Meat Sci.*, 74, 487-496.
- 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 Sci.*, 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 Sci.*, 83, 175-183.
- Prieto N., Ross D.W., Navajas E.A., Richardson R.I., Hyslop J.J., Simm G., Roehe R., 2011. Online prediction of fatty acid profiles in cross-bred Limousin and Aberdeen Angus beef cattle using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal*, 5, 155-165.
- 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 Sci.*, 80, 697-702.
- Sahar A., Boubellouta T., Lepetit J., Dufour E., 2008. Potentiel de la spectroscopie de fluorescence pour discriminer différents muscles et pour prédire certains paramètres physico-chimie de la viande. JSMTV, Tours, France, 191-192.
- Sahar A., Boubellouta T., Portanguen S., Kondjoyan A., Dufour E., 2009. Synchronous front-face fluorescence spectroscopy coupled with parallel factors (PARAFAC) analysis to study the effects of cooking time on meat. *J. Food Sci.*, 74, 534-539.
- Savenije B., Geesink G.H., Van der Palen J.P.G., Hemke G., 2006. Prediction of pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Sci.*, 73, 2693-2699.
- Sierra V., Aldai N., Castro P., Osoro K., Coto-Montes A., Oliván M., 2008. Prediction of the fatty acid composition of beef by near infrared transmittance spectroscopy. *Meat Sci.*, 78, 248-255.
- Skjervold P.O., Taylor R.G., Wold J.P., Berge P., Abouelkaram S., Culioli J., Dufour E., 2003. Development of intrinsic fluorescent multi-spectral imagery specific for fat, connective tissue, and myofibers in meat. *J. Food Sci.*, 68, 1161-1168.
- Swatland H.J., 1987a. Autofluorescence of adipose tissue measured with fibre optique. *Meat Sci.*, 19, 277-284.
- Swatland H.J., 1987b. Measurement of the gristle content in beef by macroscopic ultraviolet fluorimetry. *J. Anim. Sci.*, 65, 158-164.
- Swatland H.J., Gullett E., Hore T., Battenham S., 1995. UV fiber-optic probe measurements of connective tissue in beef correlated with taste panel scores for chewiness. *Food Res. Intern.*, 28, 23-30.
- Thyholt K., Isaksson T., 1997. Differentiation of frozen and unfrozen beef using near-infrared spectroscopy. *J. Sci. Food Agric.*, 73, 525-532.
- Veberg A., Sørheim O., Moan J., Iani V., Juzenas P., Nilsen A.N., Wold J.P., 2006a. Measurement of lipid oxidation and porphyrins in high oxygen modified atmosphere and vacuum-packed minced turkey and pork meat by fluorescence spectra and images. *Meat Sci.*, 73, 511-520.
- Veberg A., Vogta G., Wolda J.P., 2006b. Fluorescence in aldehyde model systems related

to lipid oxidation. *LWT-Food Sci. Technol.*, 39, 562-570.

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. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 9, 185-198.

Viljoen M., Hoffman L.C., Brand T.S., 2007. Prediction of the chemical composition of mutton with near infrared reflectance spectroscopy. *Small Rum. Res.*, 69, 88-94.

Weeranatanaphan J., Downey G., Allen P., Sun D., 2011. A review of near infrared spectroscopy in muscle food analysis: 2005-2010. *J. Near Infrared Spectros.*, 19, 61-104.

Wold J.P., Lundby F., Egelanddal B., 1999. Quantification of connective tissue (hydroxyproline) in ground beef by autofluorescence spectroscopy. *J. Food Sci.*, 64, 377-383.

Zamora-Rojas E., Garrido-Varo A., De Pedro-Sanz E., Guerrero-Ginel J.E., Perez-Marin D., 2013. Prediction of fatty acids content in pig

adipose tissue by near infrared spectroscopy: at line *versus in situ* analysis. *Meat Sci.*, 95, 503-511.

Zandomenighi M., 1999. Fluorescence of cereal flours. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 878-882.

Zhou L.J., Wu H., Li J.T., Wang Z.Y., Zhang L.Y., 2012. Determination of fatty acids in broiler breast meat by near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Sci.*, 90, 658-664.

## Résumé

Ces dernières années, la spectroscopie dans le proche infrarouge et la spectroscopie de fluorescence ont fait preuve d'une efficacité remarquable pour l'obtention d'estimations rapides et précises des paramètres de qualité des produits agricoles. Cette synthèse fait le point de l'état des connaissances sur l'application de ces technologies pour l'estimation de la qualité de la viande et des produits carnés. Un bref rappel des fondements théoriques des techniques est d'abord exposé. Les possibilités actuelles de leur application analytique aux différents paramètres de la qualité de la viande sont ensuite décrites. Les deux techniques montrent un grand potentiel pour la prédiction des composants du muscle et la détermination des différents paramètres de la qualité de la viande. Cependant, malgré l'important effort de recherche réalisé jusqu'à présent sur le sujet, la plupart des résultats montrent que leur utilisation pratique reste encore limitée. Les causes de ces performances sont décrites. Les résultats de l'utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge dans une optique de traçabilité sont plus prometteurs. Cette technologie peut être utilisée pour détecter différents types de viande entrant dans la composition des produits carnés, différencier la viande fraîche de la viande décongelée ou pour authentifier l'alimentation des animaux.

## Abstract

*The use of non-invasive methods for the estimation of meat quality: Near infrared spectroscopy and fluorescence spectroscopy*

In recent years, near infrared reflectance spectroscopy and fluorescence spectroscopy have proved to be very efficient and advanced techniques for monitoring the quality attributes of agricultural products. The present review gives an overview on the state of knowledge of the use of these technologies for the estimation of the quality of meat and meat products. Firstly, the principles of both techniques are presented, and the actual possibilities of their analytical applications for estimating the attributes of meat quality are described. Both techniques show a great potential to predict the muscle composition and meat quality. However, in spite of the great research effort performed, their application in practice is still limited. The causes of these performances are discussed. Otherwise, near infrared reflectance use for traceability is more advanced. The results seem very promising when this technique is used for detecting different meat types in the composition of meat products, for discriminating fresh from frozen-thawed meat or for the authentication of animal feeding.

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 Prod. Anim.*, 28, 197-208.