



HAL
open science

Étude du continuum pratiques d'élevage des bovins – carcasse – muscle – viande pour une gestion optimale des qualités des produits: stratégies statistiques applicables pour l'analyse de métadonnées

Mohammed Gagaoua, Brigitte Picard, Valérie Monteils

► **To cite this version:**

Mohammed Gagaoua, Brigitte Picard, Valérie Monteils. Étude du continuum pratiques d'élevage des bovins – carcasse – muscle – viande pour une gestion optimale des qualités des produits: stratégies statistiques applicables pour l'analyse de métadonnées. 24. Rencontres autour des recherches Ruminants (3R), Dec 2018, Paris, France. hal-02738212

HAL Id: hal-02738212

<https://hal.inrae.fr/hal-02738212>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude du continuum pratiques d'élevage des bovins – carcasse – muscle – viande pour une gestion optimale des qualités des produits : stratégies statistiques applicables pour l'analyse de métadonnées

GAGAOUA M. (1), PICARD B. (1), MONTEILS V. (1)

(1) Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

RESUME

Les expérimentations en production animale génèrent de grands nombres de données individuelles que nous dénommons ici métadonnées. Ces dernières n'ont pas fait l'objet d'exploitations approfondies en sciences animales, y compris dans la filière viande, en comparaison à d'autres disciplines. Nos travaux qui ont pour objectif le pilotage conjoint des propriétés des carcasses et des viandes bovines par les pratiques d'élevage, s'appuient sur les métadonnées du continuum allant de la phase d'élevage, d'abattage jusqu'aux qualités sensorielles de la viande bovine. Pour répondre à cet objectif nous avons mis en œuvre plusieurs stratégies statistiques pour l'analyse de métadonnées issues d'expérimentations INRA caractérisant ce continuum de la ferme à la viande. Deux démarches ont été appliquées. La première a porté sur la prédiction des qualités des carcasses et de la viande à partir des pratiques d'élevage. La seconde a consisté en l'atteinte d'objectifs prédéfinis en termes de qualité sensorielle, en particulier la tendreté, à partir des pratiques d'élevage afin d'identifier des leviers d'action. Dans cette communication, nous illustrerons ces stratégies au travers de 2 exemples de résultats. Dans le premier exemple, nous avons créé des groupes de pratiques d'élevage, et observé en quoi ces groupes différaient en termes de qualités carcasse et viande. Pour cela nous avons appliqué une approche statistique se basant sur l'analyse en composantes principales (ACP) couplée à la classification *k*-means. Cette méthode a donné de meilleurs résultats en comparaison à l'ACP couplée à l'analyse de classification hiérarchique (CAH) ou partitionnement autour des médoïdes (PAM). A partir de 16 facteurs de pratiques d'élevage liés à la vie de l'animal dont la période de finition nous avons distingué grâce à l'ACP-*k*-means 3 groupes de typologie de pratiques d'élevage. Le deuxième exemple, utilisant le même jeu de données, a consisté à étudier l'apport de la régression PLS (ou analyse des moindres carrés partiels) combinée aux arbres de décision (méthode d'apprentissage supervisée) pour l'identification de variables importantes du continuum, afin de proposer une prédiction de classes de tendreté. Ainsi, l'ensemble de ces méthodes d'analyses de métadonnées permet de proposer aux différents acteurs de la filière des recommandations pour une gestion conjointe des propriétés des carcasses et des viandes recherchées.

Beef quality management based on the continuum data from farmgate-to-meat: which statistical strategies for meat science metadata analyses?

GAGAOUA M. (1), PICARD B. (1), MONTEILS V. (1)

(1) Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

SUMMARY

Animal production experiments generate large numbers of individual data called metadata. However, these have not been extensively used in animal sciences including meat science compared to other disciplines. Therefore, our project intend to use meat science metadata that spread over the continuum, from farmgate-to-meat, to identify how can we jointly manage carcass and beef qualities using rearing practices applied during the whole life of the animals. To achieve this challenging objective, we implemented several statistical strategies to analyze the metadata of the continuum from farmgate-to-meat. In this paper, we will present two examples of our current results obtained using two different statistical approaches to analyze individual datasets from several INRA experiments. We implemented two strategies to analyze the continuum metadata. The first one consisted on beef qualities prediction using rearing practices. The second one consisted in achieving predefined objectives in terms of sensory quality, namely tenderness, using rearing practices in order to identify optimal management decisions for beef sector. The first example concerns an interesting statistical approach based on Principal Component Analysis (PCA) combined with the *k*-means clustering method after data standardization to create 3 groups of rearing practices. A dataset of 110 Rouge des Prés cows from different farms was used. For this, 16 rearing factors related to the animal's life and the finishing period were used to implement the ACP-*k*-means approach, which showed better results compared to PCA combined with hierarchical clustering analysis (HCA) and partitioning around medoids (PAM) to identify distinct groups of rearing practices. The second example explored the potential of chemometrics, based on partial least squares (PLS) combined with supervised learning methods (decision trees) for the identification of important variables from the continuum, using the first dataset of 110 Rouge des Prés cows to propose a prediction tool of tenderness. Overall, these statistical approaches showed the possibility to propose recommendations to take decision about the joint management of carcass and beef qualities to reach the targeted market specifications for both stakeholders and consumers.

INTRODUCTION

En France, la filière bovine cherche à répondre au mieux à la demande des marchés et des consommateurs en termes de qualités de viande. Afin de fournir des éléments d'aide à la décision, différentes approches et méthodologies ont été proposées pour i) prédire les qualités sensorielles de la viande et ii) comprendre les sources de leur variabilité et le déterminisme de chaque qualité (Berri *et al.*, 2016). Cependant, plusieurs difficultés limitent ces développements et sont majoritairement dues à la variabilité non maîtrisée des caractéristiques de la carcasse et de la viande. Les indicateurs qui permettent de définir le potentiel qualité sont le résultat d'une succession de facteurs du continuum de la ferme à la viande (Guerrero *et al.*, 2013 ; Gagaoua *et al.*, 2018a). Ces facteurs qui se situent à différents niveaux ont été considérés objectivement dans les études expérimentales pour étudier d'une part, leur impact sur les qualités carcasses et viande et d'autre part, pour appréhender les variations dans les qualités recherchées. C'est dans l'objectif d'une gestion optimale de l'élevage des bovins et donc des qualités de leurs produits, que nous avons proposé la mise en place et l'utilisation du continuum de métadonnées à 4 niveaux (Figure 1) : pratiques d'élevage des bovins – carcasse – muscle – viande. Les principales finalités de cette approche d'analyse de données individuelles (métadonnées) sont de : i) développer des outils statistiques pour mettre en relation les différents éléments du continuum ; ii) déterminer les modes de conduite d'élevage les mieux adaptés pour répondre aux attentes des abatteurs ; et iii) fournir aux éleveurs des outils d'aide à la décision pour un pilotage conjoint des potentiels de qualités carcasse et viande. Pour cela, un entrepôt de métadonnées rassemblant des données individuelles issues de plusieurs expérimentations INRA allant de la phase d'élevage des bovins, d'abattage jusqu'aux qualités sensorielles de la viande, a été créé.

L'étude de ce continuum, par des approches statistiques variées est un défi prometteur pour les recherches sur la viande. Ainsi, pour analyser ce continuum et répondre aux attentes des abatteurs/consommateurs, nous avons mis en œuvre des méthodes issues de la statistique exploratoire, de la modélisation et de l'apprentissage. Dans cette communication, nous illustrerons au travers de deux exemples de résultats récents, i) les stratégies statistiques applicables pour répondre aux objectifs présentés précédemment, et ii) l'apport de l'exploitation des bases de données pour la gestion des qualités des carcasses et des viandes par les pratiques d'élevage. Deux exemples de résultats issus de l'exploitation d'un même jeu de données de 110 vaches de l'AOP Maine-Anjou (race Rouge des Prés) provenant de plusieurs élevages (Gagaoua *et al.*, 2017) sont présentés.

1. METHODOLOGIE ET OBJECTIFS

Notre projet porte sur l'exploitation de données issues d'expérimentations passées conduites à l'INRA Auvergne-Rhône-Alpes (UMR Herbivores et UE Herbipôle), en se basant sur la création d'un entrepôt regroupant plusieurs bases de données individuelles expérimentales, dénommées aussi « métadonnées ». Cet entrepôt de métadonnées (Figure 1) regroupe différentes variables (ou facteurs) à 4 niveaux du continuum. Elles concernent les caractéristiques de l'animal et les pratiques d'élevage sur la vie de l'animal ou la période de finition (niveau 1 : ferme), les propriétés des carcasses (niveau 2 : abattoir), les caractéristiques musculaires (niveau 3 : muscle) et les qualités technologiques et sensorielles de la viande (niveau 4 : viande) pour chaque animal. Ces données portent sur des animaux des deux sexes et de différentes races bovines, en particulier de races allaitantes. Dans cette communication, le jeu de données utilisé (extraction de l'entrepôt) comprend 110 vaches de la race Rouge des Prés. Les animaux de cette extraction ont été abattus à l'abattoir Elivia (Lion d'Angers, 49) dans des conditions d'abattage, de

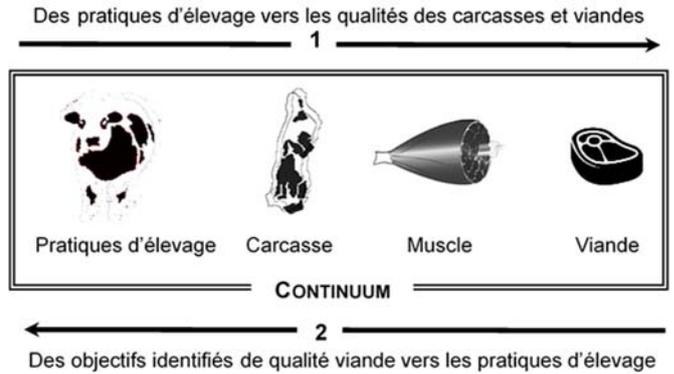


Figure 1. Continuum de métadonnées à 4 niveaux, de la ferme à la viande, montrant les 2 démarches d'analyses statistiques adoptées. La première (1) a consisté à prédire les qualités à la fois carcasse et viande à partir des pratiques d'élevages. La seconde (2) a consisté en l'atteinte d'objectifs prédéfinis en termes de qualité sensorielle de la viande à partir des pratiques d'élevage afin d'identifier des leviers d'action.

ressuyage et prélèvement des échantillons standards (Couvreur *et al.*, 2013 ; Gagaoua *et al.*, 2017). Sur ce jeu de données et comme illustré dans la Figure 1, deux démarches ont été appliquées : 1) la prédiction des qualités des viandes à partir de données relatives aux pratiques d'élevage, et 2) l'identification des pratiques d'élevage ou les variables les plus pertinentes du continuum qu'il faut utiliser pour atteindre un objectif défini de qualité de carcasse et/ou de viande.

Pour la première démarche, des typologies de pratiques d'élevage c'est-à-dire d'une répartition de 110 vaches issues de plusieurs élevages dans n classes basées sur l'observation de q descripteurs, ont été définies par une approche statistique multivariée combinée à l'analyse de partitionnement. Les typologies ont été définies en utilisant 16 variables de pratiques d'élevage liées à i) la vie de l'animal [Type (viande ou lait) ; poids à la naissance ; saison de naissance ; âge au sevrage ; durée du sevrage de l'animal ; âge à la première mise bas ; nombre de mise(s) bas et aptitude laitière] et ii) la période de finition [durée de finition ; fourrage distribué (enrubanné, foin et herbe) ; quantité journalière du concentré ; quantité totale du concentré sur la durée de finition ; activité à la ferme et âge à l'abattage]. La méthode consiste en une stratégie statistique très peu utilisée en sciences animales, à savoir la classification combinée à l'analyse en composantes principales « (ACP ; Ding et He, 2004) ».

Ainsi, les 16 variables ont tout d'abord été projetées sur l'ACP. Par la suite, nous avons couplé l'ACP avec 3 méthodes de classification : la classification hiérarchique ascendante (CAH), l'analyse k -means et l'algorithme des k -médoides (PAM). La normalisation des coordonnées des axes a été effectuée par calcul des scores Z (variables centrées et réduites) étant donné qu'il existe des effets associés aux unités différentes de chacune des variables. Il est très important d'effectuer cette normalisation (ou standardisation) afin d'obtenir des classes homogènes. Parmi les 3 méthodes testées, le tracé des 5 axes dont les valeurs propres $> 1,0$ sur un axe cartésien après normalisation, et le coefficient de silhouette des classes, ont démontré que la démarche ACP- k -means était la plus performante pour la constitution des groupes de vaches à partir des pratiques d'élevages. L'approche ACP- k -means a permis dans cette étude une meilleure classification en termes de séparation et distribution des individus. Concernant l'approche de classification retenue, l'analyse k -means (ou k -moyennes) est une méthode itérative qui génère un nombre spécifique de classes après une initialisation des centres consistant à tirer aléatoirement k individus, puis l'algorithme répète plusieurs itérations jusqu'à la convergence au critère recherché. Cette méthode suppose

un certain nombre de groupes, k , fixé *a priori*, et produit une séparation des objets en groupes sans chevauchement à l'aide de distances euclidiennes minimisées à chaque étape d'une procédure itérative. Enfin, une analyse de variance a été effectuée afin de comparer les 3 typologies de pratiques d'élevage obtenues en termes de i) données de pratiques liées à la vie de l'animal et à la période de finition, ii) caractéristiques des carcasses, iii) qualités des viandes et iv) caractéristiques des muscles, au seuil de signification de 5%.

Pour la seconde démarche, la régression PLS pour *Partial Least Squares regression* (ou régression des moindres carrés partiels) combinée aux arbres de décision a été utilisée pour la sélection de variables importantes du continuum afin de proposer une prédiction (segmentation) de la tendreté de faux-filet en différentes classes (catégories). Le principe de la régression PLS vise à maximiser la variance des prédicteurs et la corrélation entre les variables explicatives des 4 différents niveaux du continuum et la variable à expliquer, la tendreté dans notre cas. La PLS permet donc de relier une ou plusieurs variables de réponse y (variable dépendante = tendreté) à un ensemble de variables explicatives x_1, \dots, x_k dans des conditions où la régression multiple fonctionne mal ou plus du tout à cause i) de la multicollinéarité, ii) du nombre de variables plus important que les observations ou iii) de la présence de données manquantes (Geladi et Kowalski, 1986). Quant à l'arbre de décision, il s'agit d'une méthode statistique non-paramétrique aboutissant à modéliser une hiérarchie de tests sur les valeurs d'un ensemble de variables appelées attributs (Friedl et Brodley, 1997). À l'issue de ces tests, le prédicteur produit une valeur numérique ou choisit un élément dans un ensemble discret de conclusions. On parle de régression dans le premier cas et de classification dans le second. L'avantage de cette approche est la simplicité et la rapidité de lecture de l'arbre. Ainsi, la première étape de cette seconde démarche est de générer des modèles de base permettant de considérer les effets fixes et leur interaction, avant la projection des variables explicatives ($q = 59$ variables du continuum) par une PLS pour les mettre en relation et prédire la tendreté des faux-filet évaluée par la force de cisaillement. La PLS permet par la suite d'utiliser le critère de filtre VIP pour *Variable Importance for the Projection* (Mehmood *et al.*, 2012), afin de sélectionner les variables les plus importantes qui vont être utilisées pour implémenter l'arbre de décision en appliquant différents types « CHAID (*chi-square automatic interaction detector*), C&RT (*classification & regression tree*) et QUEST (*quick, unbiased, efficient, classification tree*) ». Le choix du meilleur arbre et de la meilleure méthode de construction se basent sur la puissance et la stabilité de prédiction du modèle évaluées par la précision de prédiction (Gagaoua *et al.*, 2018b).

2. EXEMPLE 1 : IDENTIFICATION DE GROUPES DE PRATIQUES D'ELEVAGE

Aujourd'hui, il est difficile de considérer la diversité des pratiques d'élevage appliquées tout au long de la vie de l'animal et leur conséquence sur les propriétés des carcasses et des viandes. De ce fait, il y a un intérêt croissant à identifier des approches statistiques performantes permettant de réduire l'information et de catégoriser les individus qui se ressemblent en termes de potentiel carcasse et viande, par l'utilisation des informations sur les pratiques d'élevage recueillies auprès des éleveurs.

La démarche appliquée dans ce premier exemple a été de constituer des classes à partir des données de pratiques d'élevage, puis de montrer si les animaux distingués par ces différentes pratiques différaient en termes de propriétés de carcasse, muscle et viande. Cette approche permet d'étudier l'impact combiné d'un ensemble de facteurs liés aux pratiques d'élevage qui caractérisent une pratique donnée, et non pas l'étude de l'influence de chaque facteur pris séparément.

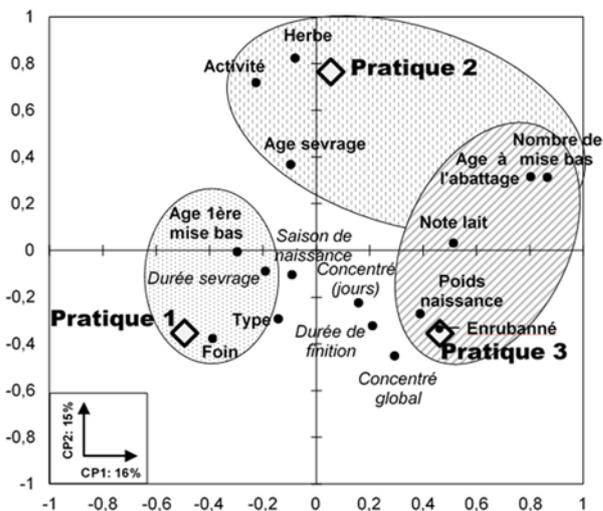


Figure 2. Séparation des 3 classes de pratiques d'élevages identifiées par l'approche ACP- k -means à partir des données liées à la vie de l'animal et à la période de finition. Les variables en caractère « gras » sont significativement différentes ($P < 0,05$) entre les classes et celles en caractère « italique » ne sont pas significatives d'après l'analyse de variance.

Ceci est rendu possible grâce à la normalisation des données par le calcul des scores Z en prenant en compte les effets confondus. Ainsi, l'ACP a été dans cette étude efficacement exploitée pour caractériser les 110 vaches, en dépit de la faible variabilité expliquée par les deux premiers axes présentés (Figure 2). Elle a permis de réduire et de synthétiser l'information relative aux 16 variables liées à la vie de l'animal et à la période de finition en 5 axes explicatifs pour les utiliser simultanément par l'analyse de classification, notamment l'approche k -means. Ce résultat corrobore ceux des études antérieures qui ont utilisé efficacement l'ACP dans les recherches sur la qualité de la viande (Destefanis *et al.*, 2000).

Trois groupes de pratiques ont été discriminés (Figure 2). Par exemple, la pratique 2 a regroupé toutes les vaches âgées avec un type génétique plutôt viande, une finition à l'herbe, une activité physique importante et une bonne aptitude laitière. Ces vaches ont les propriétés de carcasses les plus économiquement avantageuses pour les éleveurs (Gagaoua *et al.*, 2017). Il est reconnu que les pratiques de production, telles que le système d'élevage et plus particulièrement de finition des animaux, peuvent modifier les caractéristiques des carcasses en raison des différences de pratiques de finition et du régime alimentaire (Fiems *et al.*, 2000). En effet, la pratique d'élevage 2 se caractérisant par une finition à l'herbe, malgré l'âge avancé des vaches concernées, engendre des carcasses mieux conformées, ce qui est en faveur d'une augmentation de la rémunération des éleveurs. Les vaches AOP Maine-Anjou âgées et finies à l'herbe ont dans cette étude les notes de conformation ainsi que les poids de carcasses chaudes, de muscle LT et du gras de la 6^{ème} côte, les plus élevés (Gagaoua *et al.*, 2017). Néanmoins, les effets directs sur la carcasse ne sont pas faciles à évaluer. En référence aux travaux de Garlick *et al.* (1989), le renouvellement des protéines musculaires, qui peut être due à l'activité intense à la ferme, a probablement été à l'origine de la forte muscularité des vaches de la pratique 2. Par ailleurs, il a été rapporté que le renouvellement protéique joue un rôle important dans la croissance et développement musculaire des bovins (Moloney et McGee, 2017).

En outre, en raison de leur âge élevé, les vaches de la pratique 2 ont les propriétés des carcasses les plus avantageuses pour l'éleveur. Ceci est en accord avec les études antérieures qui ont montré que les bovins finis au pâturage peuvent être engrainés aussi bien que ceux finis en feedlot (Bowling *et al.*, 1977). Il ressort que la finition des vaches avec les mêmes quantités de concentré sur une durée de finition équivalente

mais avec une conduite différente (Figure 2), induit des effets significatifs. Ces résultats montrent que la pratique 2 est plus favorable aux propriétés carcasses de la Rouge des Prés. La pratique 2 permettra aux éleveurs des coûts de productions plus faibles. Ainsi, leur encouragement à opter pour la pratique 2 constitue un atout pour satisfaire les consommateurs à la recherche de viande issue d'animaux finis à l'herbe, une pratique perçue comme respectueuse de l'environnement.

Cette étude a aussi confirmé que la finition à l'herbe influence les propriétés des fibres musculaires conduisant comme attendu à des viandes plus rouges, mais avec une tendreté et des teneurs en lipides intramusculaires équivalentes aux types de finition foin (pratique 1) ou enrubbanné (pratique 3). Par exemple, Dunne *et al.* (2011) ont constaté qu'en raison d'une activité physique intense, ce qui est le cas dans cette étude, les animaux finis à l'herbe ont des teneurs plus élevées en myoglobine, et donc une couleur plus foncée. Par ailleurs, les proportions des fibres rapides glycolytiques IIX et rapides oxydo-glycolytiques IIA du muscle *Longissimus thoracis* (faux-filet), étaient respectivement, les plus faibles et plus élevées, pour les vaches de la pratique 2 (Gagaoua *et al.*, 2017). Ces résultats mettent en évidence une transition avec plus de fibres oxydatives (fibres IIA) au détriment des fibres IIX dans la pratique 2. Ces résultats peuvent être la conséquence directe de l'effet du régime et de la conduite des animaux avec une activité physique élevée des vaches au pâturage (~94% pour la pratique 2 vs ~49% et ~27% pour les pratiques 1 et 3, respectivement), induisant ainsi une orientation des fibres vers un type intermédiaire plutôt que rapide. De ce premier exemple, il apparaît qu'une pratique plutôt favorable pour les caractéristiques de la carcasse avec les mêmes conséquences sur le muscle ne l'est pas forcément pour les propriétés sensorielles de la viande, excepté pour la couleur.

Enfin, parmi les 3 méthodes de classification testées (ACP-CAH, ACP-PAM et ACP-k-means), les résultats de cette étude (Gagaoua *et al.*, 2017) nous permettent de proposer l'approche ACP-k-means comme une stratégie prometteuse pour les données de productions animales. Elle permettra d'effectuer des classifications d'animaux issus d'élevages dont les objectifs en termes de qualités carcasses et viandes sont le plus souvent différents et variés.

3. EXEMPLE 2 : SELECTION DE VARIABLES PERTINENTES ET PREDICTION DE LA TENDRETÉ PAR UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION

Dans ce second exemple, une autre approche statistique a été testée afin de considérer l'ensemble du continuum, des pratiques d'élevage à la qualité des carcasses et des viandes, pour atteindre un critère de qualité sensoriel identifié. Il s'agit de l'apport de la régression PLS combinée aux arbres de décision (Gagaoua *et al.* 2018c) pour d'une part sélectionner les variables du continuum les plus importantes, et d'autre part, proposer des outils d'aide à la décision en utilisant les variables retenues. Pour y parvenir, le même jeu de données de 110 vaches Rouge des Prés a été exploité pour cette preuve du concept comme illustré dans la Figure 3.

Brièvement, un total de 60 variables du continuum a été utilisé incluant i) 16 variables liées aux pratiques d'élevage (vie de l'animal et période de finition); ii) 8 variables de caractéristiques des carcasses (notes de conformation, note d'état d'engraissement, poids de la carcasse chaude, notes de couleur et tendreté des carcasses, poids de la 6^{ème} côte, poids du muscle et gras de la 6^{ème} côte et le rapport gras sur muscle),

iii) 30 variables de caractéristiques musculaires dont 21 biomarqueurs de la tendreté quantifiés par Dot-Blot (Gagaoua *et al.*, 2017), les % d'isoformes de chaînes lourdes de myosine, aire de section transversale des fibres, les enzymes du métabolisme et le collagène (Gagaoua *et al.*, 2018a); et enfin iv) 6 variables de qualités de viande dont la tendreté du faux-filet mesurée par la force de cisaillement par le test Warner-Bratzler (WBSF), le pH ultime, les lipides intramusculaires et les coordonnées de couleur L^* , a^* et b^* .

Le Tableau 2 présente les VIPs et les rangs pour chacune des variables explicatives retenues par la PLS pour expliquer la tendreté des faux-filets. Il ressort que parmi les 59 variables explicatives, le modèle en a retenu 24 avec des VIP > 0,80, les autres ont été éliminées. Ce filtre a amélioré la part de la variabilité expliquée (R^2X : de 0,17 à 0,31) et la puissance du lien avec la force de cisaillement (R^2Y : de 0,37 à 0,64). Le modèle final explique 75%. Parmi les 24 variables, 6 sont du premier niveau du continuum (pratiques d'élevage), 4 du niveau de l'abattoir, 11 du niveau du muscle, dont la majorité sont des biomarqueurs de tendreté et 3 sont des propriétés de la viande dont 2 des coordonnées de la couleur et le pHu.

L'arbre de décision (Figure 4) construit à l'aide de ces variables pertinentes a permis de distinguer différents groupes de force de cisaillement en utilisant seulement 5 variables dont 3 étaient les premiers prédicteurs du modèle PLS (mis en évidence en caractère gras dans le Tableau 2). Le premier séparateur était le collagène total qui a généré deux groupes (Figure 4). Comme attendu, les 15 faux-filets ayant des teneurs en collagène total élevées ($\geq 3,6 \mu\text{g d'OH-proline/mg}$), avaient les valeurs de force de cisaillement les plus élevées (faux-filet dur). Puis, le deuxième groupe ($n = 95$) a été séparé par le μ -calpaïne à un seuil de 169 UA. Le groupe de droite ($n = 26$) a

Tableau 2. Rang et VIP des 24 variables du continuum retenues par l'analyse de PLS pour expliquer la force de cisaillement de la viande des 110 vaches AOP Maine-Anjou.

Données du continuum	Rang	VIP
<i>Au niveau de la ferme : pratiques d'élevages et vie de l'animal</i>		
Age de sevrage, mois	3	1,99
Herbe, %	10	1,31
Enrubbanné, %	14	1,12
Saison de naissance	15	1,11
Type (viande ou lait)	16	0,97
Activité à la ferme, %	24	0,84
<i>Au niveau de l'abattoir : caractéristiques des carcasses</i>		
Note de conformation, 1 – 15	23	0,87
Poids de la 6 ^{ème} côte, g	20	0,94
Note couleur de la carcasse, 1 – 5	5	1,80
Note tendreté de la carcasse, 1 – 5	21	0,90
<i>Au niveau du muscle : biomarqueurs protéiques</i>		
Aire de section transversale, μm^2	2	2,01
μ -calpaïne, unités arbitraires (UA)	18	0,96
m-calpaïne, UA	6	1,64
Isocitrate déshydrogénase, $\mu\text{mol min}^{-1} \text{g}^{-1}$	7	1,57
Phosphoglucomutase 1 (PGM1), UA	11	1,27
Lactate déshydrogénase, $\mu\text{mol min}^{-1} \text{g}^{-1}$	22	0,89
Superoxyde dismutase (SOD1), UA	4	1,94
Protein deglycase (DJ1), UA	9	1,51
HSP70-8, UA	17	0,97
Collagène total, $\mu\text{g OH-proline/mg DM}$	19	0,96
Collagène insoluble, $\mu\text{g OH-proline/mg DM}$	13	1,18
<i>Au niveau de la viande : qualités de la viande</i>		
pH ultime	1	3,29
Indice de rouge (a^*)	8	1,53
Indice de jaune (b^*)	12	1,27



Figure 3. Approche de l'analyse PLS combinée à l'arbre de décision pour identifier des classes de tendreté de la viande.

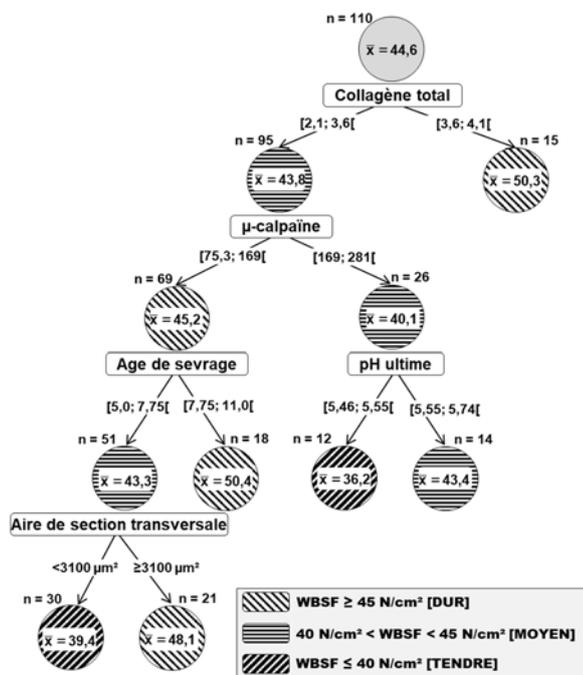


Figure 4. Meilleur arbre de décision (méthode CHAID) construit par les 5 variables présélectionnées par la régression PLS (Tableau 1). L'arbre a identifié 3 classes de tendreté en fonction de la mesure de force de cisaillement (WBSF).

ensuite été séparé par le pHu à un seuil de 5,55 regroupant les faux-filets de tendreté moyenne (n = 14) et supérieure (n = 12). Ensuite, le groupe de gauche (n = 69) a été séparé par l'âge de sevrage en un seul groupe final de la classe des faux filets durs (WBSF ≥ 45,0, n = 18) et un groupe moyen de 51 faux-filet, qui ont ensuite été classés par l'aire de section transversale des fibres en 30 faux-filet tendres et 21 durs.

De cet arbre de décision, il ressort que sur tout le continuum, les caractéristiques du muscle comme la teneur en collagène, la μ-calpaïne et les types de fibres par l'aire de section transversale, sont pertinentes pour prédire la tendreté de la viande des vaches Rouge des Prés. Les autres variables sont du niveau des pratiques d'élevage (âge de sevrage) ou de la viande (pH ultime). Pour résumer, cette approche statistique de PLS associée à des arbres de décision permet au final de proposer deux règles pour aboutir à des viandes tendres :

1) SI (la teneur en collagène total <3,6 μg OH-proline / mg) **ET** (l'abondance relative de μ-calpaïne ≥ 169 UA) **ET** (le pH ultime < 5,55) **ALORS** la viande des faux-filet est très tendre (valeurs WBSF moyennes = 36,2 N/cm², n = 12) ;

2) SI (la teneur en collagène total <3,6 μg OH-proline / mg) **ET** (l'abondance relative de μ-calpaïne <169 UA) **ET** (l'âge au sevrage <7,75 mois) **ET** (l'aire de section transversale des fibres <3100 μm²) **ALORS** la viande des faux-filet est tendre (valeurs WBSF moyennes = 39,4 N/cm², n = 30).

Ces résultats ont mis en évidence l'implication de certains mécanismes biologiques, principalement les propriétés structurales du muscle. Par exemple, l'arbre de décision révèle un lien impliquant la chute du pH représentée par la valeur du pHu et l'intensité de protéolyse évaluée par le biais de l'abondance de la μ-calpaïne. Ce résultat est en accord avec les conclusions de Kendall *et al.* (1993) et Hwang et Thompson (2001). De plus, les résultats de l'arbre de décision corroborent les mécanismes décrits concernant le déterminisme de la tendreté de la viande (Ouali *et al.*, 2013). L'implication de l'âge au sevrage ainsi que l'aire de section transversale des fibres dans la prédiction de la tendreté, peut être expliquée par le développement musculaire et ses conséquences sur le renouvellement protéique et l'effet qu'il peut avoir sur les qualités de la viande (Moloney et McGee, 2017). En effet, des études antérieures ont rapporté des relations significatives

entre la vitesse de développement de l'animal et donc de sa composition carcasse avec la tendreté de la viande de vaches en fonction de l'âge au sevrage (Meyer *et al.*, 2005). Ces résultats nous permettent de proposer l'outil PLS-arbres de décision pour une validation sur d'autres types d'animaux et d'autres qualités de viande dans un but d'utilisation par la filière bovine afin de classer (ou prédire) le potentiel qualité des carcasses peu après l'abattage.

CONCLUSIONS

Les résultats des 2 exemples mettent en évidence que le choix de l'analyse statistique à appliquer doit être réfléchi et adapté en fonction de la question posée et des données utilisées. Ainsi, il n'y a pas de règles générales à appliquer dans toutes les situations. Les différentes stratégies statistiques appliquées permettent d'identifier les facteurs liés aux pratiques d'élevage les plus influençant sur les propriétés des carcasses et des viandes. Les résultats permettront de proposer aux différents acteurs de la filière bovine plusieurs outils statistiques et des recommandations par une approche d'aide à la décision pour piloter conjointement les propriétés de carcasses et de viandes recherchées.

Les auteurs remercient le FEDER et la Région Auvergne-Rhône-Alpes pour le financement du projet S3-23000846 conduit en collaboration entre l'ARIA-ARA et la Chambre Régionale d'Agriculture ARA et Coop de France. Les auteurs remercient également l'ensemble des chercheurs INRA qui ont mis à leur disposition les données, la SICA Rouge des Prés pour les animaux et échantillons et données répertoriées dans l'entrepôt de données ou qui ont coordonné certaines des expérimentations utilisées dans ce travail.

Berri C., Picard B., Leuret B., Andueza J.D., Vautier A., Chartrin P., Beauclercq S., Lefèvre F., Legrand I. & Hocquette J.-F. 2016. Viandes et Produits Carnés, 32, 4, 1-14

Bowling R.A., Smith G.C., Carpenter Z.L., Dutson T.R., & Oliver W.M. 1977. J Anim Sci. 45, 209-15.

Couvreur S., G. Le Bec, D. Micol, G. Aminot, & B. Picard. 2013. Renc. Rech. Rum., 20, 165-168

Ding, C. & He X. 2004. Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning. ACM, 29

Destefanis G., Barge M.T., Brugiapaglia A., & Tassone S. 2000. Meat Science, 56, 255-9.

Dunne P., Monahan F. & Moloney A. 2011. Liv. Sci., 142, 1-22.

Friedl, M. A. & Brodley, C. E. 1997. Remote sensing of environment, 61(3), 399-409.

Fiems L.O., Campeneere S.D., De Smet S., Van de Voorde G., Vanacker J.M. & Boucqué C.V. 2000. Meat Sci 56, 41-7.

Gagaoua M., Monteils V., Couvreur S. & Picard B. 2017. J Agric Food Chem., 65, 8264-8278

Gagaoua M., Picard B., Soulat J. & Monteils V. 2018a. Liv. Sci., 214, 245-258

Gagaoua, M., Picard, B. & Monteils, V. 2018b. J. Sci. Food Agric. In press. 10.1002/jfsa.9301

Gagaoua M., Monteils V., Picard B. 2018c. In: Proceedings of the 64th ICoMST, pp. 1-2. Melbourne, Australia

Geladi, P., & Kowalski, B. R. 1986. Ana chim acta, 185, 1-17.

Guerrero A., Velandia Valero M., Campo M.M. & Sañudo C. 2013. Acta Sci. Anim. Sci., 35, 335-47

Hwang, I. H. & Thompson, J. M. 2001. Meat Sci, 58, 167-174.

Kendall, T. L., Koohmaraie, M., Arbona, J. R., Williams, S. E. & Young, L. L. (1993). J Anim Sci. 71(1), 96-104.

Mehmood T., Liland K.H., Snipen L. & Sæbø S. 2012. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 118, 62-69

Meyer D.L., Kerley M.S., Walker E.L., Keisler D.H., Pierce V.L., Schmidt T.B., Stahl C.A., Linville M.L. & Berg E.P. 2005. J Anim Sci. 83(12), 2752-2761.

Moloney A.P., & McGee M. 2017. In: Lawrie's Meat Science (Eight Edition) (pp. 19-47). Woodhead Publishing.

Ouali A., Gagaoua M., Boudida Y., Becila S., Boudjellal A., Herrera-Mendez C.H. & Sentandreu M.A. (2013). Meat Sci., 95, 854-870